



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES
Y REDES**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SET DE MULTIPLICADORES DE
FRECUENCIA PARA LAS BANDAS C, X Y Ku DE ALTA
FRECUENCIA UTILIZANDO TECNOLOGÍA MMIC PARA EL
LABORATORIO DE COMUNICACIONES Y MICROONDAS EN
LA FIE-ESPOCH**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROPUESTA TECNOLÓGICA

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTOR: JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ RÍOS

DIRECTOR: ING. HUGO OSWALDO MORENO AVILES P.H.D.

Riobamba-Ecuador

2019

@2019, José Luis Hernández Ríos.

Se autoriza la reproducción parcial o total, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de HERNÁNDEZ José, 2019.

Yo, JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ RÍOS, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que proviene de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 de noviembre de 2019

José Luis Hernández Ríos

060474045-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación: Tipo Propuesta Tecnológica IMPLEMENTACIÓN DE UN SET DE MULTIPLICADORES DE FRECUENCIA PARA LAS BANDAS C, X Y Ku DE ALTA FRECUENCIA UTILIZANDO TECNOLOGÍA MMIC PARA EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES Y MICROONDAS EN LA FIE-ESPOCH, de responsabilidad de José Luis Hernández Ríos, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Washington Luna

DECANO FACULTAD DE
INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

Ing. Patricio Romero

DIRECTOR DE ESCUELA DE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
TELECOMUNICACIONES Y REDES

Ing. Hugo Moreno

DIRECTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN

Ing. Jefferson Ribadeneira

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

A mi madre Patricia Ríos y a mi padre Joselito Hernández. Por su apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida, por su presencia en los momentos buenos y malos, por todos momentos difíciles por los que tuvimos que atravesar y sin embargo nos supimos levantar para seguir adelante, por su perseverancia a que nunca deje mis estudios, por el esfuerzo y sacrificio que han hecho para darnos la educación a mi hermana y a mí, se merecen toda mi más grande gratitud y respeto. A mi hermana, Mónica por cuidarme y a estar junto a mí, por sus palabras de aliento, por entenderme cuando tenía dificultades, por hacerme entender cuando hacía las cosas mal, por ser mi amiga y un ejemplo de superación. A mis abuelitos que en paz descansen, Angélica, Edelmira y Víctor. Sé que estarían muy felices y orgullosos. A mi abuelita Blanca, por apoyarme a alcanzar las metas que me proponga. A mi tío Mario por ayudar a mi familia cuando más lo necesitamos. A mi tío Ramiro por ser un gran soporte y amigo para mí. A mis profesores y amigos que estuvieron presentes a lo largo de esta etapa de mi vida brindándome su conocimiento y experiencias. A toda mi Familia.

José

AGRADECIMIENTO

A Dios por no permitirme desmayar y abandonar mis metas, a mi padre Joselito, y mi madre Patricia y a mi hermana Mónica por guiarme y ayudarme en este arduo camino. A mi amiga, compañera y enamorada Gabriela por ser mi cómplice, consejera y calidad de persona que es a mi lado, por compartir tantos momentos conmigo a lo largo de este camino. A mis grandes amigos Henry y Gabriel por ser un apoyo incondicional y moral en todos los momentos buenos y malos que hemos pasado y por ser grandes personas. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por haberme abierto las puertas de su prestigiosa institución y así lograr cumplir mi objetivo en sus respetadas aulas. A los docentes de la Escuela de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes, por compartir sus conocimientos y vivencias. Al Ingeniero Hugo Moreno, por el apoyo incondicional brindado para desarrollar este Proyecto de Titulación, por la paciencia y enseñanza en los momentos más oportunos, mi total agradecimiento y admiración.

José

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRAFICOS.....	xiii
INDICE DE ANEXOS.....	xiv

CAPITULO I

1.	MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1.	<i>Sistematización del problema</i>	2
1.3.	JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	3
1.4.	JUSTIFICACIÓN APLICATIVA.....	4
1.5.	OBJETIVOS	4
1.5.1.	<i>Objetivo General</i>	4
1.5.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	5

CAPITULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1.	MICROONDAS	6
2.1.1.	<i>Historia de la Ingeniería en microondas</i>	6
2.2.	BANDAS DE FRECUENCIA.....	8
2.2.1.	<i>Banda C (4 a 8 GHz)</i>	9
2.2.2.	<i>Banda X (8 a 12GHz)</i>	9
2.2.3.	<i>Banda Ku (12 a 18GHz)</i>	9
2.3.	MULTIPLICADORES DE FRECUENCIA	10
2.3.1.	<i>Topologías típicas de un Multiplicador de Frecuencia</i>	11
2.3.1.1.	<i>Doblador de Frecuencia</i>	12
2.3.1.2.	<i>Triplicador de Frecuencia</i>	14
2.3.1.3.	<i>Cuadruplicador de Frecuencia</i>	16
2.4.	MULTIPLICADORES CON TECNOLOGÍA MMIC	17

2.4.1.	<i>Multiplicador X2 KSX2-24+</i>	17
2.4.2.	<i>Multiplicador X3 RMK-3-123+</i>	18
2.4.3.	<i>Multiplicador X5 RMK-5-83+</i>	20
2.5.	TECNOLOGÍA MMIC	22
2.5.1.	<i>Tecnologías usadas para los MMIC</i>	22
2.5.2.	<i>Ventajas de la tecnología MMIC</i>	23
2.5.2.1.	<i>Principales ventajas de MMIC frente a HMIC</i>	23
2.6.	TECNOLOGÍA MICROSTRIP	24
2.6.1.	<i>Descripción</i>	25
2.6.1.1.	<i>Superficie Microstrip</i>	26
2.6.1.2.	<i>Microstrip Encrustado</i>	26
2.6.1.3.	<i>Cubierta Microstrip</i>	27
2.6.2.	<i>Impedancia Característica de las líneas Microstrip</i>	27
2.6.3.	<i>Curvas</i>	29
2.7.	MATERIALES	30
2.7.1.	<i>Dieléctrico Rogers</i>	30
2.7.1.1.	<i>Roger - RO4003C™</i>	31
2.7.2.	<i>Conectores SMA</i>	34
2.7.2.1.	<i>Conector SMA Hembra</i>	34

CAPITULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	36
3.1.	MATERIALES Y EQUIPOS	36
3.1.1.	<i>Materiales</i>	36
3.1.2.	<i>Equipos</i>	37
3.2.	MÉTODOS E IMPLEMENTACIÓN DEL SET DE MULTIPLICADORES	37
3.2.1.	<i>Métodos</i>	37
3.2.1.1.	<i>Situación Problemática</i>	37
3.2.1.2.	<i>Diagnóstico</i>	38
3.2.1.3.	<i>Población y Muestra</i>	38
3.2.1.4.	<i>Diseño estadístico para el análisis de la ganancia</i>	39
3.2.1.4.1.	<i>Diseño estadístico para el análisis de la ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+</i>	39
3.2.1.4.2.	<i>Diseño estadístico para el análisis de la ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+</i>	40

3.2.1.4.3. <i>Diseño estadístico para el análisis de la ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+</i>	41
3.2.2. Implementación del set de multiplicadores	42
3.2.2.1. <i>Diseño de pistas de los multiplicadores de frecuencia con tecnología MMIC X2, X3 y X5</i>	42
3.2.2.1.1. <i>Multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ (Entrada 5-10GHz / Salida 10-20GHz)..</i>	43
3.2.2.1.2. <i>Multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ (Entrada 2.2-4 GHz / Salida 6.6-12GHz)</i>	50
3.2.2.1.3. <i>Multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ (Entrada 1-1.6 GHz / Salida 5-8GHz)</i> .	54

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
4.1. RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO DE LA ENCUESTA	58
4.2. RESULTADOS ESTADÍSTICOS	60
4.2.1. <i>Resultados del análisis de la ganancia de los multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5</i>	60
4.2.1.1. <i>Ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+</i>	60
4.2.1.2. <i>Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+</i>	63
4.2.1.3. <i>Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+</i>	65
4.3. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS MULTIPLICADORES DE FRECUENCIA X2, X3 Y X5	68
4.3.1. <i>Resultados de los multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5 con tecnología MMIC</i>	69
4.3.1.1. <i>Resultados multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ (Entrada 5-10GHz / Salida 10-20GHz)</i>	70
4.3.1.2. <i>Resultado multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ (Entrada 2.2-4GHz / Salida 6.6-12GHz)</i>	71
4.3.1.3. <i>Resultado multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ (Entrada 1-1.6 GHz / Salida 5-8 GHz)</i>	74
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	81
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Designación de bandas de frecuencias	8
Tabla 2-2: Especificaciones Eléctricas X2 KSX2-24+	18
Tabla 3-2: Especificaciones Eléctricas X3 RMK-3-123+.....	19
Tabla 4-2: Especificaciones Eléctricas X5 RMK-5-83+.....	21
Tabla 5-2: Materiales de grado comercial.....	33
Tabla 6-2: Especificaciones de los Conectores SMA	34
Tabla 1-3: Factores y niveles de entrada del Multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+	40
Tabla 2-2: Factores y niveles de entrada del Multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+	40
Tabla 3-2: Factores y niveles de entrada del Multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+.....	41
Tabla 1-4: Niveles altos (1,0) y bajos (-1,0) de frecuencia y potencia de entrada del multiplicador X2 KSX2-24+	61
Tabla 2-4: Niveles altos (1,0) y bajos (-1,0) de frecuencia y potencia de entrada del multiplicador X3 RMK-3-123+.....	63
Tabla 3-4: Niveles altos (1,0) y bajos (-1,0) de frecuencia y potencia del multiplicador X5 RMK- 5-83+	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Espectro Electromagnético	7
Figura 2-2:	Sistema de comunicaciones	11
Figura 3-2:	Doblador de Frecuencia con reflector entrada/salida.....	12
Figura 4-2:	Doblador de Frecuencia empleando guía de onda a la salida	13
Figura 5-2:	Triplicador de Frecuencia	14
Figura 6-2:	Topología de un Triplicador de Frecuencia.	15
Figura 7-2:	Cuadriplicador de Frecuencia	17
Figura 8-2:	a) Multiplicador de Frecuencia MMIC X2 KSX2-24+ b) Diagrama de conexión	17
Figura 9-2:	Perdidas de conversión del Multiplicador X2 KSX2-24+	18
Figura 10-2:	a) Multiplicador de Frecuencia MMIC X3 RMK-3-123+ b) Circuito eléctrico interno.....	19
Figura 11-2:	Perdidas de conversión del Multiplicador X3 RMK-3-123+	20
Figura 12-2:	a) Multiplicador de Frecuencia MMIC X5 RMK-5-83+ b) Diagrama de conexión	20
Figura 13-2:	Perdidas de conversión del Multiplicador X5 RMK-5-83+	21
Figura 14-2:	Línea de transmisión Microstrip	25
Figura 15-2:	Estructura Microstrip	26
Figura 16-2:	Cubierta Microstrip.....	27
Figura 17-2:	Línea Microstrip.....	28
Figura 18-2:	Microstrip Curva de 90°	29
Figura 19-2:	Roger - RO4003C™	31
Figura 20-2:	Pérdida de datos de inserción.....	32
Figura 21-2:	Datos medidos de pérdida de inserción de la Microstrip	32
Figura 22-2:	Conector SMA Hembra	35
Figura 1-3:	Diseño de pista del Multiplicador de Frecuencia X2 KSX2-24+ (Vista superior)	43
Figura 2-3:	Selección de las capas de material idóneo para el multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+	44
Figura 3-3:	Cálculo de línea microstrip a 50Ω para los puertos de entrada y salida del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+	45
Figura 4-3:	Coordenadas cartesianas del puerto directo del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+	46

Figura 5-3:	Coordenadas cartesianas del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+	47
Figura 6-3:	Diseño final de pista del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ (Entrada 5-10GHz/Salida 10-20GHz).....	47
Figura 7-3:	Diseño final de pista del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ en AutoCAD.	48
Figura 8-3:	Dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ implementado. a) Vista superior b) Vista posterior	49
Figura 9-3:	Diseño de pista del Multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ (Vista superior).	50
Figura 10-3:	Coordenadas cartesianas del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+.	51
Figura 11-3:	Diseño final de la pista del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+.	52
Figura 12-3:	Diseño de pistas del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ con extensión AutoCAD.	52
Figura 13-3:	Dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ implementado. a) Vista superior b) Vista posterior.	53
Figura 14-3:	Diseño de pista del Multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ (Vista superior).	54
Figura 15-3:	Coordenadas cartesianas del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+	55
Figura 16-3:	Diseño final de la pista del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+.	56
Figura 17-3:	Diseño de pistas del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ con extensión AutoCAD.	56
Figura 18-3:	Dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ implementado. a) Vista superior b) Vista inferior.....	57
Figura 1-4:	Esquema de conexión de los multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5	68
Figura 2-4:	Sondas SMA macho 50Ω.....	69
Figura 3-4:	Adaptador hembra para RX 50Ω	69

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1-4:	Resultados de la encuesta realizada sobre el impacto que tendrá dotar de dispositivos Multiplicadores de Frecuencia en el Laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH	59
Gráfico 2-4:	Diagrama de Pareto de la ganancia del multiplicador X2 KSX2-24+	61
Gráfico 3-4:	Efectos principales de la ganancia del multiplicador X2 KSX2-24+	62
Gráfico 4-4:	Diagrama de Pareto de la ganancia del multiplicador X3 RMK-3-123+	64
Gráfico 5-4:	Efectos principales de la ganancia del multiplicador X3 RMK-3-123+	64
Gráfico 6-4:	Diagrama de Pareto de la ganancia del multiplicador X5 RMK-5-83+	66
Gráfico 7-4:	Efectos principales para la ganancia del multiplicador X5 RMK-5-83+	67
Gráfico 8-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ de 10 a 20GHz, configuración X2.	70
Gráfico 9-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ de 15 a 20GHz, configuración X3.	71
Gráfico 10-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ de 6.6 a 12GHz, configuración X3.	72
Gráfico 11-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ de 4.4 a 8GHz, configuración X2.	73
Gráfico 12-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ de 8.8 a 16GHz, configuración X4.	74
Gráfico 13-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 5 a 8GHz, configuración X5.	75
Gráfico 14-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 2 a 3.2GHz, configuración X2.	76
Gráfico 15-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 3 a 4.8GHz, configuración X3.	77
Gráfico 16-4:	Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 4 a 6.4GHz, configuración X4.	78

INDICE DE ANEXOS

Anexo A : Encuesta

Anexo B: Mediciones en los equipos de TX y RX

Anexo C: Código en Matlab

Anexo D: Datasheet Frequency Multiplier X2 KSX2-24+

Anexo E: Datasheet Frequency Multiplier X3 RMK-3-123+

Anexo F: Datasheet Frequency Multiplier X5 RMK-5-83+

RESUMEN

Se realizó la implementación de un set de multiplicadores de frecuencia para las bandas C, X y Ku de alta frecuencia utilizando tecnología de Circuitos Integrados Monolíticos de Microondas (MMIC) para el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas en la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (FIE-ESPOCH)”. El proyecto se desarrolló con el propósito de aportar en el complemento de los conocimientos recibidos en las aulas mediante la realización de prácticas de laboratorio que beneficien los procesos de enseñanza aprendizaje de los estudiantes y docentes de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones de la FIE-ESPOCH. El set de multiplicadores de frecuencia X2 KSX2-24+, X3 RMK-3-123+ y X5 RMK-5-83+ con tecnología MMIC fue implementado con nueve dispositivos que operan en el orden de las microondas, comprendido las bandas C, X y Ku en las frecuencias de 4 a 8 GHz, 8 a 12 GHz y 12 a 18 GHz respectivamente. Los diseños de las pistas de los multiplicadores de frecuencia se realizaron en el Software Ansoft Designer, el material elegido para la implementación de estos diseños es Roger RO4003C, dieléctrico utilizado en altas frecuencias. Los diseños de las pistas de los multiplicadores de frecuencia han sido modificados en los puertos de entrada y salida en sus tres modelos en particular X2, X3 y X5; debido a la necesidad de realizar un acoplamiento a 50 ohmios a fin de que encajara de manera correcta con los conectores subminiatura versión A (SMA) que son ubicados en los extremos del dispositivo. El proceso de impresión de las pistas en el material se llevó a cabo mediante rebelado de fotografía. Los multiplicadores funcionan no solo a su multiplicidad sino en los otros armónicos, permitiendo mayor operabilidad.

Palabras Claves: <TELECOMUNICACIONES>, <MICROONDAS>, <ALTA FRECUENCIA>, <CIRCUITOS INTEGRADOS MONOLÍTICOS DE MICROONDAS (MMIC)>, <MICROSTRIP>, <MULTIPLICADORES DE FRECUENCIA>, <CONECTORES SUBMINIATURA VERSIÓN A (SMA) >.

ABSTRACT

The implementation of a set of frequency multipliers for high-frequency C, X, and Ku bands by using a Monolithic Integrated Microwave Circuits (MMIC) technology for the Laboratory of Communications and Microwave at the School of Computer Science and Electronics of the Escuela Superior Politecnica de Chimborazo (FIE-ESPOCH). The project was developed to contribute and complement the knowledge acquired in the classrooms by performing laboratory practices that benefit the teaching and learning processes of students and teachers of the School of Telecommunications Engineering of the FIE-ESPOCH. The set of frequency multipliers X2 KSX2-24+, X3 RMK-3-123+, and X5 RMK-5-83+ with MMIC technology was implemented with nine devices that operate in the order of microwaves, including C, X and Ku bands at frequencies from 4 to 8 GHz, 8 to 12 GHz, and 12 to 18 GHz respectively. The designs of the tracks of the frequency multipliers were made in the Ansoft Designer Software, the material chosen for the implementation of these designs is Roger RO4003C, dielectric used in high frequencies. The designs of the tracks of the frequency multipliers were modified at the input and output ports in its three models in particular X2, X3, and X5; due to the need to make a 50 ohm coupling so that it fits correctly with the subminiature version A (SMA) connectors that are located at the ends of the device. The printing process of the tracks on the material was carried out by photo rebelling. The multipliers work not only in their multiplicity but in the other harmonics allowing greater operability.

Keywords: ^TELECOMMUNICATIONS^ <MICROWAVES>, <HIGH FREQUENCY>, <MONOLITICAL INTEGRATED CIRCUITS OF MICROWAVES(MMIC)>, <MICROSTRIP>, FREQUENCY MULTIPLIERS>, <SUBMINIATURE CONNECTORS VERSION A (SMA)>.

CAPITULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1.INTRODUCCIÓN

En los sistemas de telecomunicaciones, dentro de los dispositivos utilizados para las transmisiones inalámbricas hallamos multiplicadores de frecuencia estos dispositivos han sido un adelanto óptimo en la tecnología, puesto que estos dispositivos permiten abaratar costos de las comunicaciones. Con el avance de la tecnología los dispositivos para altas frecuencias han ido evolucionando tal manera que dichos dispositivos se trabaja con el tamaño reducido de la mano de la tecnología MMIC, un factor importante en el área de la comunicación satelital y móvil y en general para aplicaciones de microondas y ondas milimétricas, con una ventaja primordial que es accesible producirlos.

En las comunicaciones se utilizan transmisores de microondas donde se maneja un multiplicador de frecuencias, estos dispositivos realizan la función de duplicadores. Triplicadores y cuadruplicadores de frecuencia entre otros y su utilización es muy es muy esencial ya que aporta al ahorro de recursos puesto que generar señales de microondas es muy costoso, lo que se hace es ocupar señales a más baja frecuencia y mediante la utilización de multiplicadores de frecuencia se eleva a la frecuencia deseada. Estos dispositivos operan a partir de la generación de armónicos los cuales otorgan el grado de multiplicación del dispositivo, además de los componentes de las señales conocido como armónicos son frecuencias múltiplos de la frecuencia principal. Para la selección del armónico en un multiplicador determinado entra en operación un filtro pasa banda el cual dependiendo del grado de multiplicidad del dispositivo selecciona el armónico correcto y desecha todos los demás innecesarios.

El presente trabajo implementa un set de multiplicadores de frecuencia para las bandas c, x y ku de alta frecuencia utilizando tecnología MMIC, puesto que actualmente no están disponibles dichos multiplicadores en el laboratorio de Comunicaciones y Microondas en la FIE – ESPOCH, estos dispositivos será objeto de investigación e implementación, lo cuales permitirá a estudiantes y docentes de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones, fortalecer los conocimientos

adquiridos en las aulas de la facultad, además de incentivar en el desarrollo de tecnología en la provincia y el país.

En el Capítulo II se enfocará la investigación teórica de los temas más importantes y necesarios para el desarrollo del proyecto. En el Capítulo III se especifican los materiales y métodos utilizados en este proyecto, así como también las técnicas para realizarlo. En el Capítulo IV se detallan los resultados de la encuesta, el análisis del modelo estadístico de los niveles de potencia de los multiplicadores de frecuencia y la implementación del set de multiplicadores de frecuencia utilizando tecnología MMIC.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es necesario implementar un set de multiplicadores de frecuencia para las bandas c, x y ku de alta frecuencia utilizando tecnología MMIC para el laboratorio de comunicaciones y microondas para prácticas de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones?

1.2.1. Sistematización del problema

¿Es necesario analizar las características y comportamiento de una señal a alta frecuencia?

¿Cuáles son los requerimientos que deben cumplir los multiplicadores a diseñar?

¿Qué elementos electrónicos y tecnologías cumplen con los requisitos de alta frecuencia?

¿Se diseñará e implementará de acuerdo a los parámetros de altas frecuencias?

¿Cumple las condiciones de un set de multiplicadores a diseñar para el trabajo con alta frecuencia?

1.3.JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En el laboratorio de Comunicaciones y Microondas de la Facultad de Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, dispone de medidores de señales como Analizador de espectro, Generador de señales de 0 a 20 GHz. Se propone implementar un set de multiplicadores de frecuencia de alta frecuencia utilizando tecnología MMIC para el laboratorio de la FIE-ESPOCH.

La climatización del laboratorio es uno de los recursos fundamentales para realizar pruebas, investigativas, del comportamiento de las señales en Alta Frecuencia y de esta forma poder dar mejores herramientas, necesarias de aprendizaje.” (EDUforics, 2018)

ROGERS. El material posee las propiedades necesarias para los diseñadores de circuitos de microondas, RF, redes de adaptación y líneas de transmisión de impedancia controlada, ofrecen una gama de constantes dieléctricas dependiendo a su necesidad. (Rogers Corporation, 2017)

Por lo tanto, partiendo de este concepto, el material Rogers es diseñado especialmente para circuitos de microondas.

Como futuros profesionales en la carrera de Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes, nace la necesidad de realizar un set de multiplicadores de frecuencia utilizando una tecnología adecuada la altas frecuencia llamada MMIC, destinados al laboratorio de comunicaciones y microondas, este set de multiplicadores de frecuencia será una herramienta fundamental que servirá de gran ayuda en las prácticas de laboratorio.

Al finalizar el proyecto se espera integrar las prácticas de microondas ya que se implementará con el material adecuado para trabajar en este rango de frecuencia.

1.4.JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

Para el laboratorio de Comunicaciones y Microondas de la Facultad de Informática y Electrónica se implementará un set de 3 multiplicadores de frecuencia los cuales estarán diseñados de la siguiente manera, cada set de multiplicadores de frecuencia dispondrá de 3 multiplicadores los cuales son X2, X3 y X5. Estos estarán diseñados en las bandas C, X, y Ku.

Para la implementación de estos dispositivos se va a investigar las características que nos brindan las componentes con los que operan los multiplicadores.

La adaptabilidad de estos dispositivos en el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas permitirá a los estudiantes realizar diversas prácticas, en las cuales podrán comprender la diferencia entre trabajar con dispositivos implementados con materiales idóneos para alta frecuencia y dispositivos realizados con otros materiales los cuales no permiten dar una mayor operatividad en la banda de microondas.

1.5.OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Implementar un set de multiplicadores de frecuencia para las bandas C, X, y Ku de alta frecuencia utilizando tecnología MMIC para el laboratorio de comunicaciones y microondas en la FIE – ESPOCH.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Diseñar Multiplicadores con tecnología MMIC para las bandas de C, X y Ku.
- Implementar 3 set de multiplicadores de alta frecuencia utilizando la tecnología MMIC para el laboratorio de comunicaciones y microondas, cada set constara de tres multiplicadores de frecuencia (X2, X3, X5).
- Comprobar el funcionamiento del set de multiplicadores de alta frecuencia utilizando la tecnología MMIC para el laboratorio de comunicaciones y microondas.
- Realizar las pruebas y análisis de resultados del comportamiento de los componentes.
- Realizar manual de usuario y guía de laboratorio del set de multiplicadores de frecuencia.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1.MICROONDAS

2.1.1. *Historia de la Ingeniería en microondas*

La ingeniería de microondas a menudo se considera una disciplina bastante madura porque los conceptos fundamentales fueron desarrollados hace más de 50 años, la primera aplicación importante de la tecnología de microondas se desarrolló intensamente durante la segunda guerra mundial. Sin embargo, los últimos años han traído avances sustanciales y continuos en los dispositivos de alta frecuencia de estado sólido, circuitos integrados de microondas (MMIC) y sistemas micro electromecánicos (MEMS) realizados con técnicas de diseño asistido por computadora (CAD). (Mini-Circuits, 2019)

En el campo de los MMIC las capacidades necesarias cubren desde el desarrollo de procesos constructivo/productivos (Foundry) al diseño y test de componentes MMIC multifunción. Para ser eficientes las capacidades de desarrollo de MMIC deben incluir: técnicas de modelado de componentes, técnicas de diseño y técnicas de prueba y mediciones. (Merletti, 2016)

Si inicialmente la tecnología MMIC se localizaba en etapas de conversión de la señal o modulación-demodulación (osciladores, mezcladores, amplificadores de potencia y de bajo ruido), hoy cada vez es mayor la tendencia a incorporar funciones de procesamiento de la señal en banda base y funciones de control en un contexto mixto analógico-digital.

Las habilidades requeridas para el desarrollo de esta tecnología cubren un amplio abanico: desde la fabricación de semiconductores hasta el diseño de circuitos de microondas, pasando por el diseño de circuitos electrónicos analógicos y digitales. (Pascual, 2006)

Dentro de las diversas líneas de “flujo de conocimiento” que poseen los estudios de telecomunicación, podrían considerar que en la asignatura de Diseño de Circuitos MMIC van a converger otras tres que denominaríamos: “circuitos electrónicos”, “electrónica de alta frecuencia” y “microelectrónica”.

Hoy en día gracias a la ingeniería de microondas existen aplicaciones cada vez crecientes, tomando un rol fundamental en nuestro diario vivir. Es decir, forman parte de las comunicaciones inalámbricas, redes, seguridad y en el ámbito de telecomunicaciones conectando a su estudio en la televisión, radio, comunicaciones satelitales, redes inalámbricas, telefonía celular y la radioastronomía.

Las microondas son la porción del espectro electromagnético que cubre el rango de frecuencias entre 0.3 GHz y 30GHz, que corresponde a la longitud de onda en el vacío ($\lambda = c/f$) entre 100 cm. y 1 cm, que son señales con longitudes de onda del orden de centímetros y por eso se denomina como ondas centimétricas, las señales con longitudes de onda del orden de milímetros se refieren a menudo como ondas milimétricas son las que varían desde 30 GHz hasta los 300 GHz, estas señales por su comportamiento son similar a las microondas aún pueden considerarse dentro de la banda de las microondas. (Castillo, 2014)

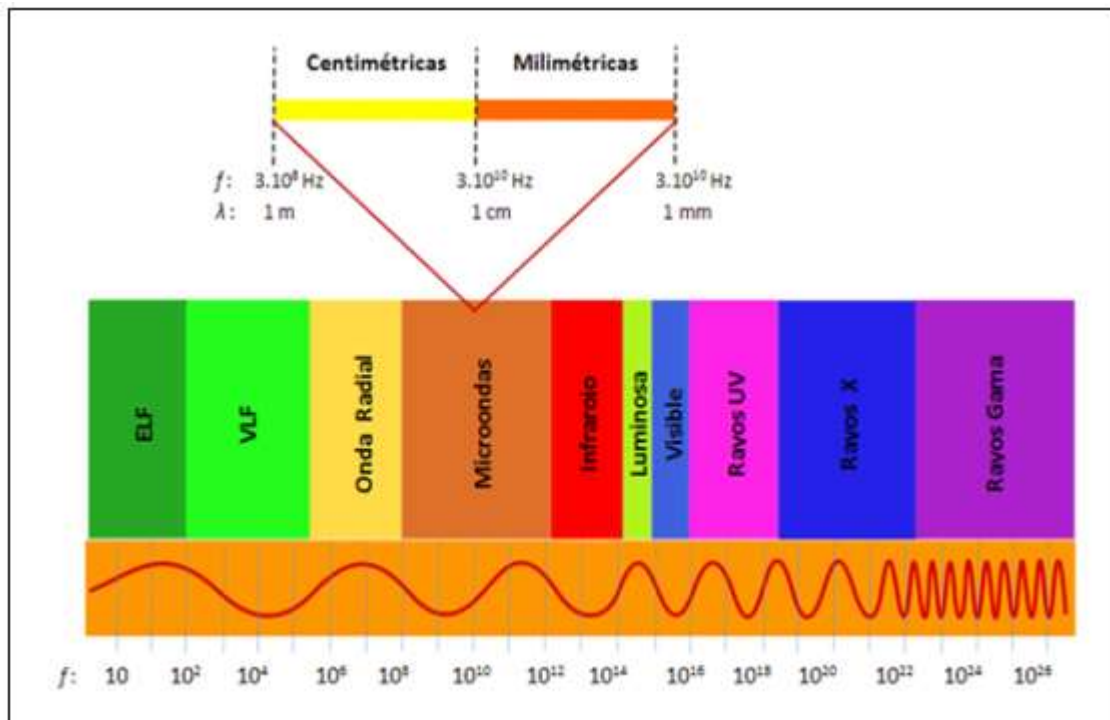


Figura 1-2: Espectro Electromagnético

Fuente: (Castillo, 2014)

En la tabla 1-2 se puede observar la denominación de las bandas de frecuencia de acuerdo con el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), para un mejor entendimiento de la distribución del espectro de radiofrecuencia.

Tabla 1-2: Designación de bandas de frecuencias

FRECUENCIAS (GHz)	BANDAS	UTILIZACIÓN
1 -2	L	Comunicaciones móviles por satélite.
2 - 4	S	Comunicaciones móviles por satélite, fijas, radiodifusión.
4 - 8	C	Intelsat, satélites nacionales: Westar, satcom, Comstar (USA), Anik (Canada), STW, Chinasat (CHINA), Palaga (Indonseria) telecom I (Francia), CS-2 (Japon), Molinya, Intersputnik (URSS) Bandas ampliadas, CAMR-79, 85, 88.
8 - 12	X	Satélites gubernamentales y militares.
12 - 18	Ku	Intelsat, Eutelsat, satélites naciones, DBS.
18 – 26	K	Radiodifusión, fijos.
26 - 40	Ka	Japón, Europa, USA Enlaces Inter satélites.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Fuente: (Castillo, 2014)

2.2. BANDAS DE FRECUENCIA

Las bandas de microondas que se utilizaran en el presente trabajo pertenecen al espectro electromagnético.

2.2.1. Banda C (4 a 8 GHz)

Esta banda se utiliza para comunicarse por satélite, dispositivos WiFi, telefonía inalámbrica, y algunos sistemas de radares meteorológicos. Esta fue la primera banda de frecuencia utilizada para transmisiones comerciales de telecomunicaciones vía satélites.

Debido que el diámetro de la antena es proporcional a la longitud de onda, de la onda que recibe las antenas de banda C son mayores que la banda Ku, la banda C es más confiable bajo condiciones adversas como, la lluvia o el granizo, sin embargo, la banda C está más congestionada y es más vulnerable hacia interferencia terrestre. (C-Band, 2016)

2.2.2. Banda X (8 a 12GHz)

La banda X está definida en el rango de frecuencias del espectro radioeléctrico comprendidas entre 8 y 12 GHz. (Radar: Types Principles, Bands, Hardware, 2000), Sin embargo, en aplicaciones de comunicaciones el rango varía y se sitúa de 7 a 11.2 GHz.

Las principales aplicaciones de esta banda con las comunicaciones por satélite, radares y redes inalámbricas.

2.2.3. Banda Ku (12 a 18GHz)

La banda Ku es una de las más versátiles del espectro de microondas comprendida entre 12-18 GHz, proporciona servicios de banda ancha por satélite a través de platos pequeños (1 metro o menos de diámetro) y de comunicaciones de datos de dos vías. Cualquier servicio de video, de datos o de voz se puede proporcionar en la banda Ku, y hay satélites que proporcionan cobertura de banda Ku en varias partes del mundo. Los servicios en banda Ku son muy confiables, y aunque la lluvia produce mayores pérdidas que la banda C, esta pérdida se puede compensar a través de tecnología, por lo que la disponibilidad resultante en la banda Ku es aceptable para la mayoría de las aplicaciones.

10.7 - 11.7 GHz

Servicios satelitales fijos (FSS)

11.7 - 12.2 GHz

Frecuencias de bajada de los Servicios de Difusión por Satélite (BSS). Esta banda se utiliza para las señales de televisión.

14.5 - 14.8 GHz

Frecuencias de subida, para la banda Ku anterior.

17.3 - 18.1 GHz

Banda alterna Ku para BSS. (Carlos Duarte Muñoz, 2014)

2.3. MULTIPLICADORES DE FRECUENCIA

Un multiplicador de frecuencia es un circuito que produce un número múltiplo entero, o muchos múltiplos enteros, de una señal de salida dada. Un multiplicador de frecuencia a veces se denomina generador de armónicos porque la salida del circuito es un armónico de la frecuencia de salida fundamental. La mayoría de los multiplicadores operan a la segunda o tercera armónica de la frecuencia de entrada y se conocen como duplicadores y triplicadores, son más eficientes que los que operan con armónicas de mayor orden. Los multiplicadores operan en cascada si se necesita mayor multiplicación.

La estabilidad en frecuencia de los osciladores MF (Medium Frequencies) es superior a la de los osciladores VHF (Very High Frequency, banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz) y UHF (Ultra High Frequency), banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 MHz a 3GHz). Por tanto, es conveniente emplear un oscilador MF como generador de onda portadora en el transmisor. No obstante, debido a que las emisoras de FM operan a frecuencias por encima del límite superior del MF de 30 MHz, deben utilizarse multiplicadores de frecuencia en las etapas del transmisor después del OM (Multiplexor Óptico) para obtener la frecuencia portadora asignada que se va a transmitir. Los multiplicadores de frecuencia utilizados en transmisores de FM aumentan la desviación, pero no el índice de modulación. Esto ocurre porque cuando una señal de FM pasa a través de un multiplicador de frecuencia, la frecuencia portadora y la desviación de frecuencia se multiplican. La relación de multiplicación es igual al número de armónicos al cual se ha sintonizado la salida. En la figura 2- 2, indica la desviación necesaria que se obtiene a través de multiplicadores y mezclador. Obsérvese el efecto tanto de la frecuencia portadora F_c como del

índice de modulación MF a medida que las señales avanzan a través de los multiplicadores y el mezclador. (Rábanos, 2012)

El mezclador transforma de nuevo la portadora a su frecuencia original, con la desviación multiplicada por el número de armónicos de los multiplicadores. Seleccionando cuidadosamente los multiplicadores y la frecuencia del oscilador para el mezclador, obtendremos las frecuencias de información y portadora de salida deseadas.

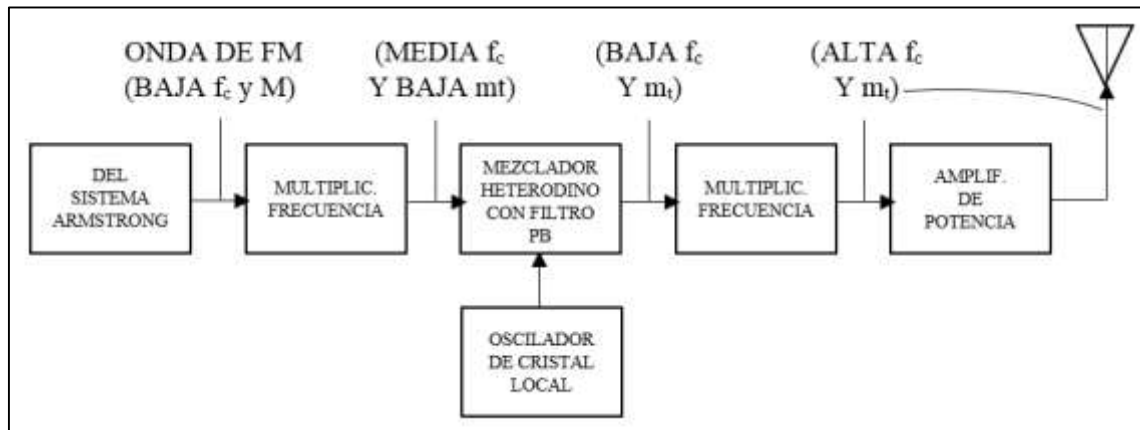


Figura 2-2: Sistema de comunicaciones

Fuente: (Rábanos, 2012)

2.3.1. Topologías típicas de un Multiplicador de Frecuencia

Los parámetros más importantes de un multiplicador de frecuencia son su ganancia de multiplicación, las pérdidas de retorno, y la potencia de salida en condiciones estables de operación. Estas condiciones pueden ser optimizadas sintonizando los circuitos de entrada y salida para conseguir las impedancias deseadas a las frecuencias del fundamental y de los armónicos. Esta solución puede funcionar en multiplicadores de banda estrecha, presentando un ancho de banda fraccional de menos de un 10%. Para el diseño de multiplicadores de banda ancha, los factores Q de los dispositivos de entrada y salida tienen que ser minimizados por una carga resistiva, la cual contribuye también a la estabilidad del circuito. Por lo tanto, la topología adecuada se selecciona para proporcionar el funcionamiento deseado. Por ejemplo, al ingresar en una topología balanceada un FET (Transistor de Efecto de Campo), en la frecuencia inicial este transistor rechaza dicha frecuencia y los armónicos impares de la salida, a su vez empleando tecnología MMIC, se puede conseguir multiplicadores con anchos de banda de una octava. (Camargo, 1998)

2.3.1.1. Doblador de Frecuencia

Doblar en frecuencia es la aplicación más común de los multiplicadores de frecuencia debido a su alta eficiencia, simplicidad del circuito, y la generación mínima de armónicos indeseados. En aplicaciones de sistemas de radio, los dobladores de frecuencia se diseñan normalmente para baja potencia ($<10\text{mW}$), seguidos de un amplificador buffer. A pesar de que se pueden obtener salidas con mayor potencia de un multiplicador, no es preferible debido a la alta generación de armónicos indeseados. Uno de los primeros trabajos en multiplicadores de frecuencia, (Pan, 1978) empleó una red simple para la adaptación de entrada a la frecuencia del fundamental, y una red para la adaptación de salida a la frecuencia del segundo armónico, seguido de un reflector al fundamental. Este diseño reportó 1 dB de ganancia de multiplicación, y pasaba de una frecuencia de 4 GHz a una de 8 GHz. Este resultado originó una tendencia en la investigación de multiplicadores de frecuencia con FETs que sigue su curso hoy en día. Una forma tentativa de proporcionar buena adaptación de impedancia, y control de la fase reflejada del fundamental y segundo armónico se muestra en la Figura 3-2, para pasar de 12 GHz a 24 GHz. (Iyama, Y., Iida, T. Takagi, y S. Urasaki, 1989)

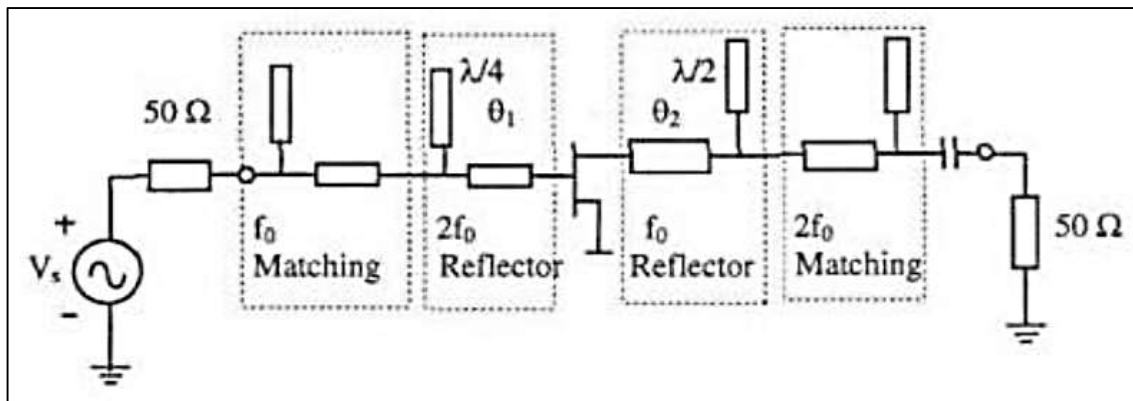


Figura 3-2: Doblador de Frecuencia con reflector entrada/salida

Fuente: (Iyama, Y., Iida, T. Takagi, y S. Urasaki, 1989)

En la puerta, un reflector para el segundo armónico se conecta cerca del dispositivo, mientras que la red de adaptación de entrada al fundamental se conecta cerca del generador. En el drenador, también se conecta cerca del dispositivo un reflector para el fundamental, seguido de una red de adaptación para el segundo armónico. Este circuito reportaba una ganancia de multiplicación de entre 3 y 6 dB para una potencia de entrada de 7 dBm.

Una topología importante cuando la frecuencia de salida se encuentra en el rango de onda milimétrica se muestra en la Figura 4-2, donde el circuito de entrada es construido en tecnología

microstrip mientras que el circuito de salida es construido en guía de onda, cuyas dimensiones son prácticas de manejar a estas frecuencias. El circuito de entrada contiene un condensador de bloqueo C_b , y las líneas de transmisión $TL1$, $TL2$ y $TL3$ para la adaptación. El stub acabado en circuito abierto $TL3$, además de servir para la adaptación a la frecuencia del fundamental, también es un filtro para el segundo armónico. La mejor eficiencia se obtiene ajustando la terminación de drenador al fundamental, variando la longitud de la línea de transmisión serie $TL7$. La adaptación de impedancias al segundo armónico se obtiene ajustando un tornillo de sintonía en la zona de la guía de onda. Las líneas de transmisión $TL8$ y $TL9$ son de 90° de longitud al fundamental, y actúan como filtro de rechazo a esa frecuencia. Este filtro es transparente al segundo armónico. Los otros dos elementos $TL10$ y $TL11$, con dimensiones de 45° cada uno, funcionan como filtro al segundo armónico. (Rauscher, 1983)

La guía de onda es un filtro de paso alto y rechaza la frecuencia del fundamental de forma inherente. El segundo armónico, y los armónicos superiores se propagan por la guía de onda. Si el doblador de frecuencia está bien diseñado, la corriente de RF será aproximadamente media senoide, donde el contenido del tercer armónico es bajo, y el cuarto armónico tiene una amplitud muy baja. Una publicación pionera en esta área (Rauscher, 1983), reportó esta topología, obteniendo una ganancia de multiplicación de -1 dB a una frecuencia de salida de 30 GHz, y una potencia de salida de 8 dBm.

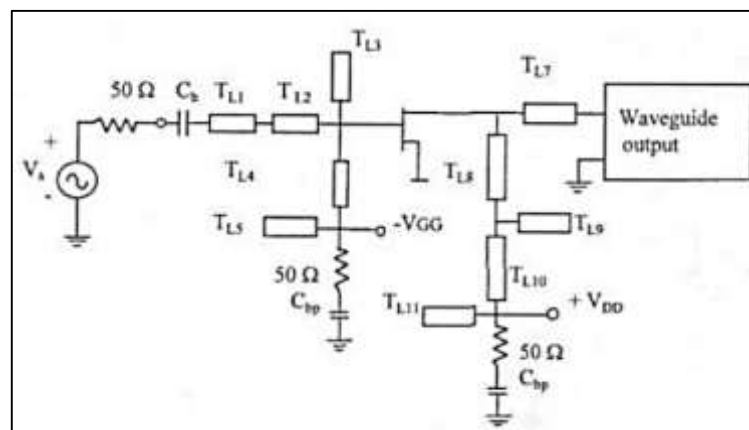


Figura 4-2: Doblador de Frecuencia empleando guía de onda a la salida

Fuente: (Rauscher, 1983)

En todos estos diseños se acopla un filtro paso banda a la salida para limpiar el espectro. Otra opción para construir un doblador de frecuencia es simplemente conectar en el drenador un filtro

paso banda centrada en la frecuencia del segundo armónico, en serie con una línea de transmisión desfasadora.

2.3.1.2. Triplicador de Frecuencia

Una dificultad importante en los triplicadores de frecuencia es la necesidad de cortocircuitar el drenador a los armónicos indeseados. En un doblador de frecuencia es fácil de hacer usando stubs de longitud $\lambda/4$, los cuales efectivamente cortocircuitan el primer y tercer armónico, mientras que el cuarto y los armónicos superiores son suficientemente débiles para tenerlos en cuenta. La red de salida puede ser difícil de diseñar, el resultado inevitable es el de una terminación subóptima, lo que hace que sea muy difícil optimizar la eficiencia, además de correr riesgo de inestabilidad. (Rosu, 2011)

Una topología típica de un triplicador de frecuencia (Rosu, 2011), se muestra en la Figura 5-2.

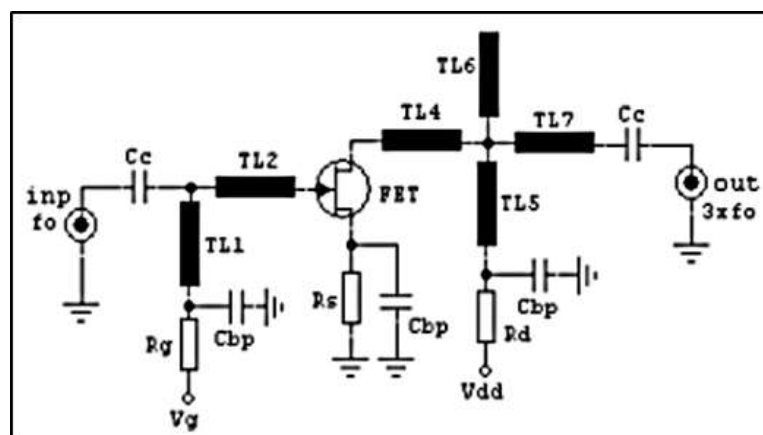


Figura 5-2: Triplicador de Frecuencia

Fuente: (Rosu, 2011)

El stub de entrada, conectado a tierra a altas impedancias por un condensador, proporciona adaptación para la frecuencia del fundamental, mientras que al mismo tiempo facilita la entrada de la polarización en puerta proporcionando cierto desacoplo.

El esquema de polarización adoptado por el triplicador de frecuencia es una disposición de auto polarización con una resistencia entre fuente y tierra. Esta configuración de auto polarización tiende a llevar al transistor a zonas cercanas a pinch-off. El valor de la resistencia es la que

determina cuan cerca está el transistor de pinch-off, cuanto más grande sea el valor de la resistencia más cercano estará el punto de trabajo de pinch-off.

La salida cuenta con una disposición de doble stub, estos stubs tienen múltiples funciones. La primera, forman una adaptación de salida para el deseado tercer armónico. La segunda es que implementan cierto filtrado sobre el fundamental y el segundo armónico. Usando stubs reales puede ser difícil filtrar el fundamental sin rechazar el tercer armónico al mismo tiempo. Esto ocurre al considerar una configuración de stubs simple para rechazar el fundamental, la cual es un stub $\lambda/4$ acabado en circuito abierto. Sin embargo, esta longitud equivale a una longitud de $3\lambda/4$ al tercer armónico, por lo que tiende a rechazar también esta frecuencia. Como consecuencia, el diseño de los stubs de salida implica un compromiso en términos de rechazo a la frecuencia inicial 1 y segundo armónico, sin afectar excesivamente la respuesta del tercer armónico. (Mantovani, 1984)

Los stubs de salida son esencialmente stubs acabados en cortocircuito, el corto a alta frecuencia lo proporciona el condensador a tierra. Estos stubs facilitan también la polarización de drenador.

En la figura 6-2 se representa una topología con una diferente elección al usar un circuito drenador con un filtro pasa banda y un stub terminado en circuito abierto para ajustar las terminaciones de la frecuencia principal y el segundo. (Mantovani, 1984)

El circuito de drenador está compuesto por un filtro paso banda encargado de entregar el tercer armónico a la carga, en serie con la línea de transmisión $TL5$, que actúa como desfaseador. La polarización se realiza a través de las líneas $TL6$ y $TL7$, estas líneas bloquean la frecuencia del tercer armónico, y presentan una respuesta de tipo filtro paso bajo a la frecuencia del fundamental y del segundo armónico.

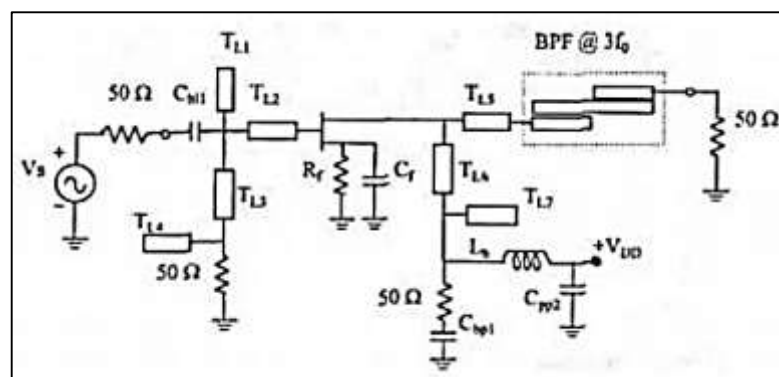


Figura 6-2: Topología de un Triplicador de Frecuencia.

Fuente: (Mantovani, 1984)

El propósito del filtro de polarización de entrada es similar al usado en el doblador de frecuencia, acoplar el generador a la puerta y absorber los armónicos reflejados.

En este tipo de multiplicadores el ancho de banda está limitado por la habilidad del desfasador de un drenador para que los paracitos de la salida del dispositivo puedan resonar, y por la desadaptación de la impedancia de puerta con la frecuencia. Las pérdidas de retorno dependen de la impedancia de entrada del dispositivo, por lo que puede ser necesario un aislador de entrada para una mejor operación. (Mantovani, 1984)

2.3.1.3. Cuadriplicador de Frecuencia

Los cuadriplicadores de frecuencia son menos eficientes que los triplicadores y los dobladores, pero su simplicidad de diseño comparado con los multiplicadores con diodos está ganando aceptación en la industria.

Un cuadriplicador de frecuencia puede obtenerse como una extensión del doblador de frecuencia, donde el filtro es modificado para rechazar las frecuencias de la frecuencia principal, segundo y tercer armónico. Si se polariza el transistor en clase C, el cuarto armónico será únicamente unos 3 dB menor que el segundo y tercer armónico, por el contrario, esto hace que se dificulte la adaptación de la impedancia de entrada. Sin embargo, si se polariza como una clase B, la potencia del cuarto armónico será 15 dB menor que la del segundo. Una forma de resolver parcialmente este problema es usar un transistor con una puerta más grande, de esta forma se tendrá una mayor corriente, y por lo tanto una mayor transconductancia, mejorando razonablemente el rendimiento del multiplicador. (Camargo, 1998)

Una topología típica (Camargo, 1998), para este tipo de multiplicador sería similar a la que se muestra en la Figura 7-2. Con la particularidad de que el segundo stub acabado en circuito abierto TL_8 debe tener la mitad del tamaño del primero TL_6 , para rechazar el segundo armónico y presentar bajas pérdidas a la frecuencia del cuarto armónico.

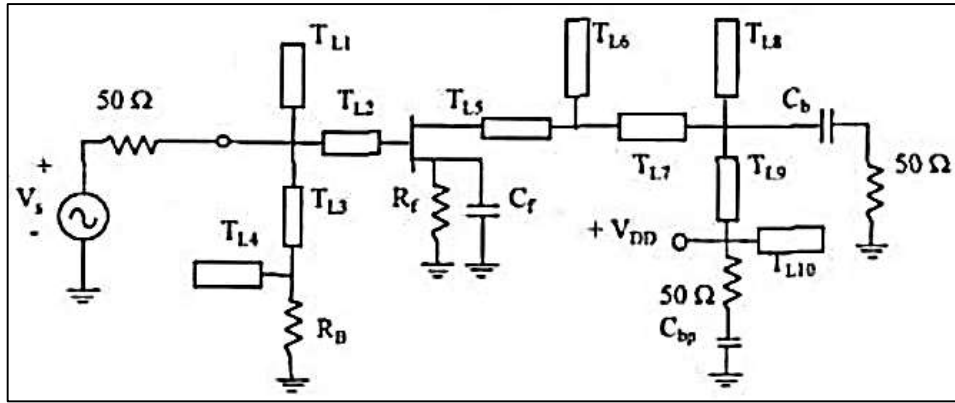


Figura 7-2: Cuadriplicador de Frecuencia

Fuente: (Camargo, 1998)

Este circuito está alimentado con una $VDD = 5\text{ V}$. La frecuencia del fundamental va de 4.5 a 5.5 GHz, con una potencia de entrada de 10 dBm se obtiene una ganancia de multiplicación de -7 dB entre 4.7 y 5.3 GHz. (Camargo, 1998)

2.4. MULTIPLICADORES CON TECNOLOGÍA MMIC

2.4.1. Multiplicador X2 KSX2-24+

El X2 KSX2-24+ de Mini Circuits es un multiplicador de frecuencia con frecuencia de entrada de 5 a 10 GHz, frecuencia de salida de 10 a 20 GHz, potencia de entrada de 10 a 16 dBm, armónicos de 29 a 34 dBc, pérdida de conversión de 11.5 a 18.5 dB. (Mini-Circuits, 2019)

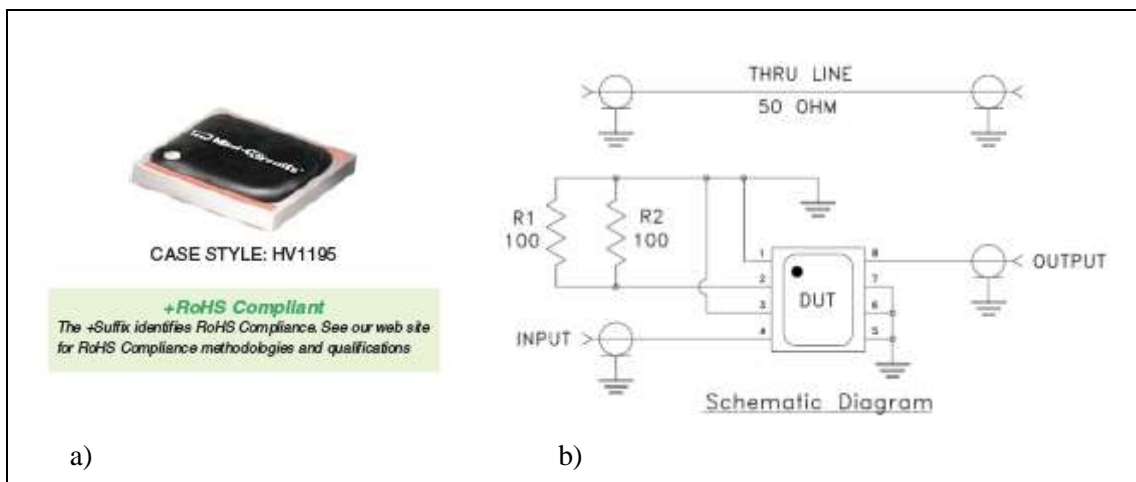


Figura 8-2: a) Multiplicador de Frecuencia MMIC X2 KSX2-24+ b) Diagrama de conexión

Fuente: (Mini-Circuits, 2019).

Tabla 2-2: Especificaciones Eléctricas X2 KSX2-24+

FACTOR DE MULTIPLICACION	FRECUENCIA (GHz)		POTENCIA ENTRADA (dBm)		PÉRDIDA DE CONVERSIÓN (dB)		SALIDA ARMONICA (dBc)					
	F1	F2					F1	F3	F4			
	Input	Output	Min.	Max.	Typ.	Max.	Typ. Min.	Typ. Min.	Typ. Min.			
2	5-8	10-16	13	16	11.5	15	30	18	35	23	25	15
			10	13	15	18	21	14	30	18	20	13
	8-10	16-20	13	16	12	15	33	20	27	17	50	35
			10	13	15	18.5	30	16	23	16	40	30

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

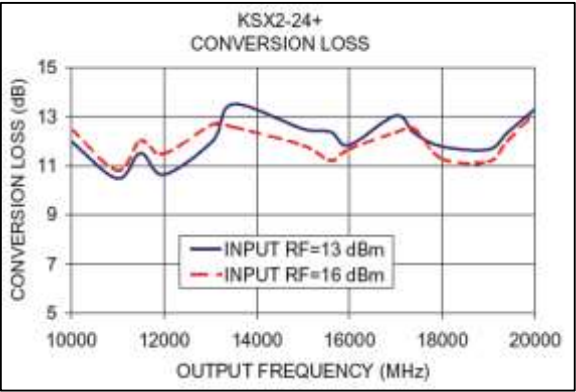


Figura 9-2: Perdidas de conversión del Multiplicador X2 KSX2-24+

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

2.4.2. Multiplicador X3 RMK-3-123+

El X3 RMK-3-123+ de Mini Circuits es un multiplicador de frecuencia con frecuencia de entrada de 2.2 a 4 GHz, frecuencia de salida de 6.6 a 12 GHz, potencia de entrada de 13 a 17 dBm, armónicos de 5 a 45 dBc, pérdida de conversión de 15.5 a 21 dB. (Mini-Circuits, 2019)

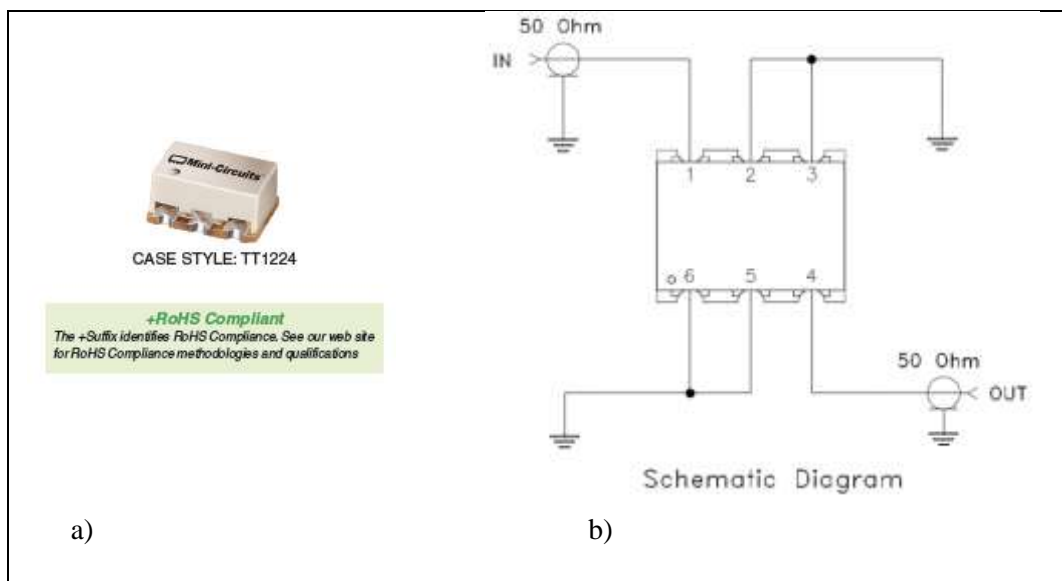


Figura 10-2: a) Multiplicador de Frecuencia MMIC X3 RMK-3-123+ b) Circuito eléctrico interno

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

Tabla 3-2: Especificaciones Eléctricas X3 RMK-3-123+

FACTOR DE MULTIPLICACION	FRECUENCIA		POTENCIA		PÉRDIDA DE		SALIDA ARMONICA		
	(MHz)		ENTRADA		CONVERSIÓN		(dBc)		
	F1	F3	(dBm)		(dB)		F1	F2	F4
	Input	Output	Min.	Max.	Typ.	Max.	Typ. Min.	Typ. Min.	Typ. Min.
3	2200-4000	6600-12000	13	17	15.5	21	5 -5	33 22	45 24

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

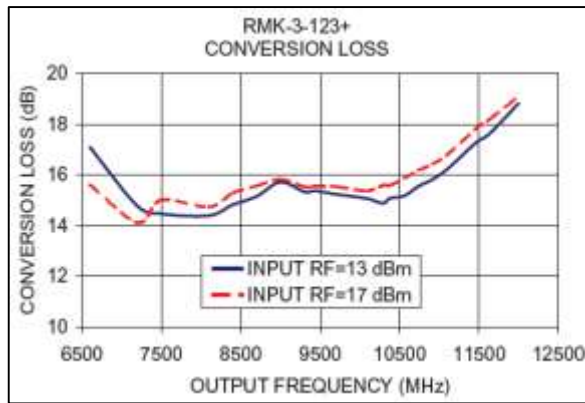


Figura 11-2: Perdidas de conversión del Multiplicador X3 RMK-3-123+

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

2.4.3. Multiplicador X5 RMK-5-83+

El multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de Mini-Circuits proporciona un factor de multiplicación de 5, que convierte las frecuencias de entrada de 1000 a 1600 MHz a las frecuencias de salida de 5000 a 8000 MHz, y admite aplicaciones como sintetizadores, osciladores locales, convertidores de satélite arriba y abajo y más. La unidad proporciona un rango de potencia de entrada de +7 a +11 dBm, pérdida de conversión de 28 dB y buena supresión de armónicos. El dispositivo está alojado en paquete miniatura de montaje superficial

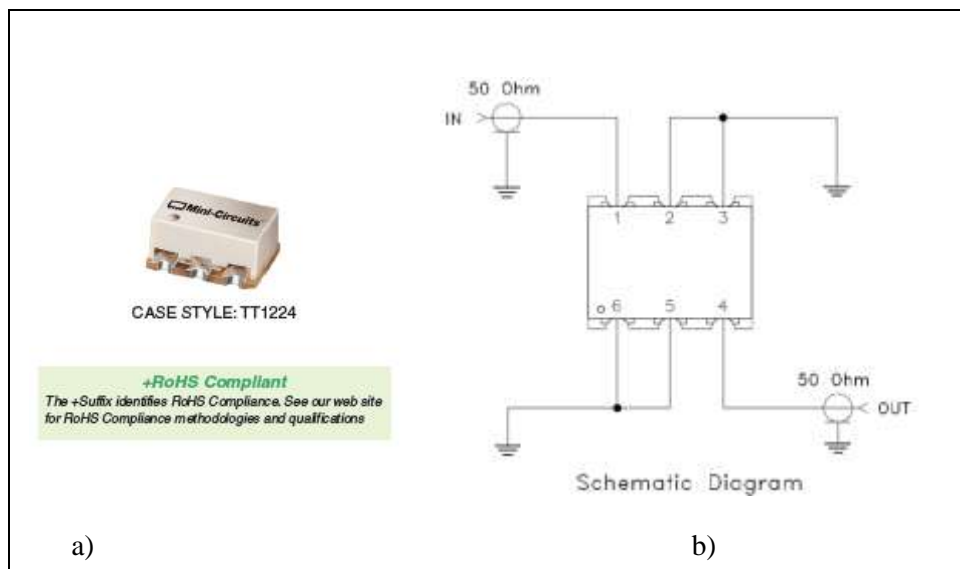


Figura 12-2: a) Multiplicador de Frecuencia MMIC X5 RMK-5-83+ b) Diagrama de conexión

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

Tabla 4-2: Especificaciones Eléctricas X5 RMK-5-83+

PARÁMETROS	Min.	Typ.	Max.	Unit
Factor de Multiplicación		5		
Rango de Frecuencia, Entrada (F1)	1000		1600	MHz
Rango de Frecuencia, Salida (F5)	5000		8000	MHz
Potencia Entrada	7	–	11	dBm
Perdida de Conversión	–	28	34.5	dB
Salida Armónica	F1	-15	-3.5	–
	F2	32	62.5	–
	F3	-15	-4.2	–
	F4	32	56.2	–
	F6	30	58.3	–
	F7	-4	10.2	–
				-dBc

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

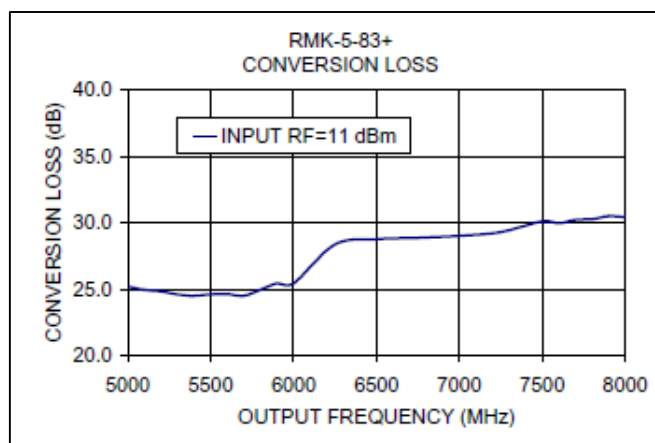


Figura 13-2: Perdidas de conversión del Multiplicador X5 RMK-5-83+

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

2.5. TECNOLOGÍA MMIC

MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit), que han aparecido en las últimas décadas, constituyen una tecnología que está ejerciendo una profunda influencia en el diseño de sistemas de microondas. Un MMIC es un circuito de microondas en el que los componentes activos y pasivos se fabrican sobre el mismo sustrato conductor, esto es, no hace falta conectarlos al circuito, sino que van integrados en el mismo. Ésta es la diferencia principal respecto a los circuitos HMIC's (Hybrid-MIC), donde los componentes activos de estos circuitos no se integraban en el mismo sustrato, sino que aparecían como elementos discretos sobre éste. En MMIC, el sustrato debe ser activo y capaz de acomodar las líneas de transmisión y los componentes pasivos necesarios, además de cumplir una serie de requisitos exigibles tales como buen comportamiento en RF, facilidad de proceso, tamaño y peso reducidos, bajo coste, posibilidad de implementar los dispositivos sobre él de manera adecuada, etc. (Bibing, 2017).

Los circuitos MMI o MMIC son un tipo de circuitos integrados que operan en frecuencias de microondas, es decir, entre 300 MHz y 300 GHz. La técnica de fabricación de los circuitos MMIC se basa en la utilización de líneas de transmisión planares, y se realiza con compuestos de semiconductores compuestos, tales como el arseniuro de galio (GaAs), nitrato de galio (GaN) y el germanio de silicio (SiGe). (Linares Mora, Jair Alonzo)

Los MMIC son dimensionalmente pequeños (desde 1 mm² a 10 mm²) y pueden ser producidos a gran escala, lo que ha facilitado su proliferación en dispositivos de alta frecuencia, los dispositivos en la tecnología MMIC son activos, estos permiten a los transistores crear mezcladores y amplificadores con una ganancia y un ancho de banda apropiada, la S/E de los dispositivos MMIC se adaptan, generalmente, con una impedancia característica de 50 ohmios. Esto facilita el uso de dichos dispositivos, así como uso en forma de cascada, ya que no requieren red de adaptación externa. Adicionalmente, la mayoría de los equipamientos de pruebas de microondas se diseñan para operar en unas condiciones de 50 ohmios. (Linares Mora, Jair Alonzo)

2.5.1. Tecnologías usadas para los MMIC

Las tecnologías más usadas para los circuitos integrados de MMIC son:

- GaAs MESFET: Opera hasta 20 GHz, con buena Figura de ruido y potencia de salida,
- AlGaAs/GaAs HEMT: Opera hasta 100 GHz, con crecimiento epitaxial. Los MESFETs son remplazados por HEMTs, más rápidos y con un consumo menor.

- Bipolar en sílice: se está convirtiendo en la amenaza de la tecnología GaAs
- Sílice-Germanio: estructura vertical con problemas de calentamiento (aplicaciones pulsadas, teléfonos móviles).
- AlGaAs/GaAs y sustrato AlGaAs/InGaAs/GaAs HBT.
- Sustratos InAlAs/InGaAs HEMT, HBT o InP. (Bibing, 2017)

2.5.2. Ventajas de la tecnología MMIC

Si inicialmente la tecnología MMIC se localizaba en etapas de conversión de la señal o modulación-demodulación (osciladores, mezcladores, amplificadores de potencia y de bajo ruido), hoy cada vez es mayor la tendencia a incorporar funciones de procesamiento de la señal en banda base y funciones de control en un contexto mixto analógico-digital. Las habilidades requeridas para el desarrollo de esta tecnología cubren un amplio abanico: desde la fabricación de semiconductores hasta el diseño de circuitos de microondas, pasando por el diseño de circuitos electrónicos analógicos y digitales.

Las principales ventajas de los MMIC's son un menor coste de producción una vez realizado el diseño, menores tamaños y pesos, así como número de conexiones, o excelentes prestaciones en circuitos con tolerancias estrictas.

La evolución y desarrollo de la tecnología MMIC ha sido considerable. Algunos de los factores que han contribuido a este auge son:

- Los procesos tecnológicos de fabricación de los circuitos MMIC, son fundamentalmente para la constitución de la idea de diseño en un chip.
- El desarrollo de paquetes CAD/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing), de diseño y fabricación asistidas por computador, que han hecho al diseñador que su tarea le resulte mucho más fácil, trabajando con entornos de diseño que permiten realizar todo tipo de simulaciones. (Pascual, 2006)

2.5.2.1. Principales ventajas de MMIC frente a HMIC

En el mercado existe tecnología Híbrida que son los HMIC, dicho componente tiene una tecnología consolidada y este es el principal competidor de la tecnología MMIC.

A continuación, se menciona las principales ventajas de la tecnología MMIC frente a la tecnología HMIC.

- Menor tamaño. El circuito diseñado ocupa un área muy pequeña en comparación con el encapsulado.
- Buena reproducibilidad. Una vez obtenido el circuito prototipo con un funcionamiento adecuado, podremos obtener a partir de él todos los circuitos que precisemos con idénticas características. En cambio, en los HMIC, la reproducibilidad es más pobre, debido al soldado y a los cables de enganche.
- Manejo más sencillo. Permite la posibilidad de montar módulos independientes susceptibles de ser unidos posteriormente para formar el chip definitivo.
- Mayor ancho de banda y mayores frecuencias de trabajo (efectos parásitos menores)
- Buena fiabilidad. En los HMIC no es tan buena debido a los elementos parásitos.
- Menor coste potencial en grandes producciones, en las que el precio por oblea procesada disminuye muy por debajo del coste por procesar una sola, pudiendo en estos casos ser competitiva la tecnología MMIC frente a HMIC. (Pascual, 2006)

2.6. TECNOLOGÍA MICROSTRIP

La tecnología Microstrip permite realizar dispositivos cada vez más pequeños, de poco peso, de fácil adaptación con otros circuitos y de bajo costo.

La colocación del material de esta placa es simple, donde se encuentra un plano único como tierra, un trazado conductivo y una capa dieléctrica, esta separa el conductor con la señal y el plano tierra. Los conductores de banda están bien aislados por el material dieléctrico circundante. Como resultado, no irradian y se describen como no dispersivos.

Debido a esto, las líneas de transmisión en circuitos de línea de cinta pueden estar espaciadas de cerca y densamente empaquetadas, prestándose a la miniaturización a frecuencias de microondas. Sin embargo, con las capas adicionales, son más difíciles de ensamblar y fabricar que los circuitos de Microstrip con sus conductores de capa superior.

Los diseños de circuito de Microstrip se pueden beneficiar de un material de PCB con una combinación de baja constante dieléctrica y baja pérdida, como RT / duroid® 5880 de Rogers Corporation. Está basado en un dieléctrico (PTFE) para una pérdida mínima, pero reforzado con microfibras de vidrio para una estabilidad mecánica mejorada.

La constante dieléctrica es baja y está estrechamente controlada, 2.20 ± 0.02 a 10 GHz, para mantener la impedancia de los rastros conductivos fabricados en circuitos de Microstrip. (Microwave Journal, 2010).

Como se mencionó anteriormente la Microstrip es una forma muy simple pero útil de crear una línea de transmisión con una PCB. Hay algunas ventajas al usar una línea de transmisión Microstrip sobre otras alternativas.

La aproximación de modelado se puede usar para diseñar la traza de Microstrip. Al comprender la línea de transmisión de Microstrip, los diseñadores pueden construir adecuadamente estas estructuras para satisfacer sus necesidades. (EEWeb, 2017).

Como se observa en la Figura 14-2 se puede decir que una línea de transmisión Microstrip consiste en una traza de cobre que es separada de un plano de tierra, por un componente aislante.

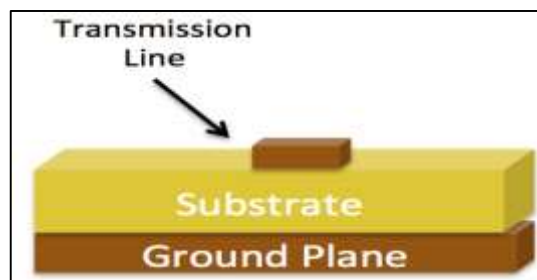


Figura 14-2: Línea de transmisión Microstrip

Fuente: (Vestenicky, 2013).

Para abaratar costes, los Microstrip pueden ser contruidos sobre un sustrato ordinario FR4 (estándar PCB). Las desventajas de Microstrip en comparación con la guía de onda son la potencia suele ser menor capacidad y pérdidas más altas. También, a diferencia de la guía de onda, Microstrip no es incluido y por lo tanto es susceptible a la radiación la diafonía y accidental. (Global Sources, 2018).

2.6.1. Descripción

Una Microstrip está contruida con un conductor plano suspendido sobre un plano de tierra. El conductor y el plano de tierra están separados por un dieléctrico. La línea de transmisión de micro banda su fase también tiene espacio libre (aire) como el dieléctrico sobre el conductor.

Dicha estructura puede estar compuesta en materiales que no sean circuitos impresos, pero este siempre debe estar compuesto por un conductor, un material dieléctrico y un plano de tierra.

2.6.1.1. Superficie Microstrip

En la Figura 15-2 a), se muestra la superficie o Microstrip expuesta, la línea de señal está expuesta (al aire) y hace referencia a un plano de potencia o de tierra. Se clasifican de acuerdo con la disposición del dieléctrico con respecto a la traza (por debajo o por encima de la traza).

El siguiente diagrama muestra la estructura de Microstrip de superficie usando una única capa dieléctrica debajo del rastro de señal. (Polar, 2017).

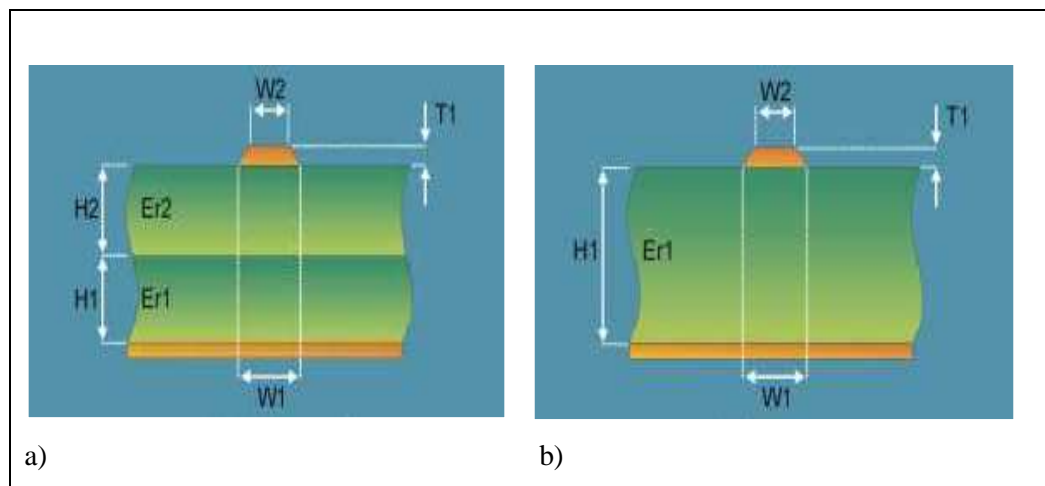


Figura 15-2: Estructura Microstrip

Fuente: (Polar, 2017).

La Figura 15-2 b), muestra la estructura de Microstrip de superficie utilizando dos capas dieléctricas debajo del trazado.

2.6.1.2. Microstrip Encrustado

La Microstrip incrustada o enterrada es similar a la versión de superficie, sin embargo, la línea de señal está incrustada entre dos dieléctricos y se encuentra a una distancia conocida del plano de referencia. Microstrip tiene dos capas incrustadas, una encima del rastro en esta estructura y una

debajo, estos dieléctricos están colocados uno debajo y otro encima del trazado, incrustar la línea de señal puede reducir la impedancia hasta en un 20% en comparación con una construcción de Microstrip de superficie equivalente. (Polar, 2017).

2.6.1.3. Cubierta Microstrip

La Microstrip recubierta es similar a la versión de superficie, sin embargo, la línea de señal está cubierta por una máscara de soldadura, por esta máscara de soldadura la impedancia puede ser disminuida en ohmios, considerando el grosor y el tipo de máscara de soldadura.

En la Figura 16-2 a) y b) se observa la cubierta Microstrip con un solo dieléctrico debajo del rastro.

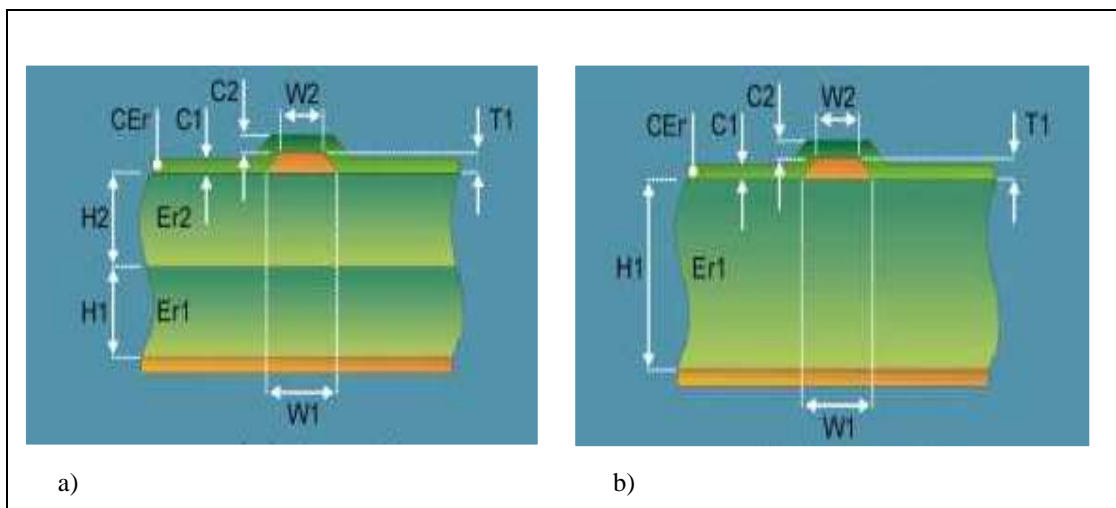


Figura 16-2: Cubierta Microstrip

Fuente: (Polar, 2017).

2.6.2. Impedancia Característica de las líneas Microstrip

Las líneas de Microstrip se utilizan ampliamente para interconectar la lógica de alta velocidad circuitos en computadoras digitales porque pueden ser fabricados por técnicas automatizadas y proporcionan la señal uniforme. En la Figura 17-2 se puede ver que la impedancia característica de una línea de Microstrip está en función de la anchura de la línea de banda, el espesor de la línea, la distancia entre la línea, el plano de tierra, y el dieléctrico homogéneo constante del material de la placa.

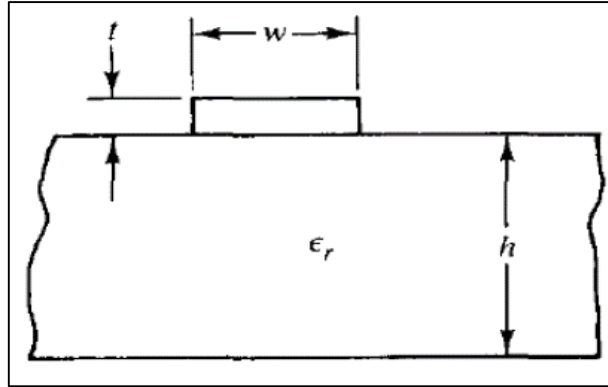


Figura 17-2: Línea Microstrip

Fuente: (Siwakar, 2016).

A continuación, se muestra la formula aproximada de forma cerrada para el cuasi-estático de la impedancia característica de una Microstrip la cual fue desarrollada por Wheeler.

$$Z_{microstrip} = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{1+\epsilon_r}} \ln\left(1 + \frac{4h}{\omega_{eff}} + \sqrt{\left(\frac{14 + \frac{8}{\epsilon_r}}{11} \frac{4h}{\omega_{eff}}\right)^2 + \pi^2 \frac{1 + \frac{1}{\epsilon_r}}{2}}\right)$$

Ecuación 1-2

ω_{eff} = Anchura eficaz, es decir el ancho real de la banda.

$$\omega_{eff} = \omega + t \frac{1 + \frac{1}{\epsilon_r}}{2\pi} \ln \left(\frac{4e}{\sqrt{\left(\frac{t}{h}\right)^2 + \left(\frac{1}{\pi} \frac{1}{\omega + \frac{11}{t}}\right)^2}} \right)$$

Ecuación 2-2

Donde:

Z_0 = Impedancia del espacio libre

ϵ_r = Permitividad relativa del sustrato

w = Ancho de la tira

h = Espesor de sustrato

t = Grosor de la tira de la metalización

En la mayoría de los casos, el error de impedancia es menor del 1% e inferior al 2%

2.6.3. Curvas

Con el fin de construir un circuito completo en Microstrip, a menudo es necesario para el camino de una tira para activar a través de un ángulo grande. Una curva brusca 90° en un Microstrip causará una porción significativa de la señal en la franja de reflejarse hacia su fuente, con sólo una parte de la señal transmitida en la curva. (Copro, 2017).

Uno de los medios de efectuar una curva de baja reflexión, es la trayectoria de la banda en un arco de radio por lo menos 3 veces la anchura de banda de la curva. Al utilizar una técnica más conocida y que abarca un área más pequeña del sustrato, es utilizar una curva inglete.

Para una primera aproximación, una brusca curva sin inglete se comporta como un puesto entre el plano de tierra y la curva en la franja de la capacitancia en derivación. Inglete la curva reduce el área de metalización y elimina así la capacidad de excesiva. La Mitra de porcentaje es la fracción de la diagonal entre las esquinas internas y externas de la curva sin inglete cortado, Ver Figura 18-2. La Mitra óptima para una amplia gama de geometrías Microstrip se ha determinado experimentalmente por Douville y James. (Copro, 2017).

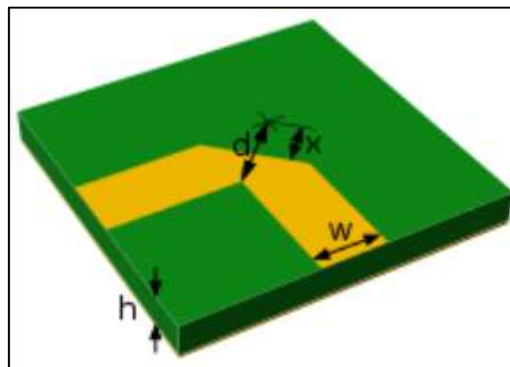


Figura 18-2: Microstrip Curva de 90°

Fuente: (Copro, 2017).

El porcentaje óptimo es dada por:

$$M = 100 \frac{x}{d} \% = \left(52 + 65e^{-\frac{27w}{20h}} \right)$$

Ecuación 3-2

Donde: $\frac{w}{h} \geq 0.25$ y la permitividad relativa de sustrato es $\epsilon_r \leq 25$

2.7. MATERIALES

En las frecuencias de microondas se aplican altos requisitos a los materiales para la construcción de dispositivos finales. Se encuentran disponibles varios sustratos dieléctricos para tecnologías de Microstrip, pero los precios de estos materiales son directamente proporcionales a sus buenas características dieléctricas.

2.7.1. Dieléctrico Rogers

Corporación Rogers utiliza la banda X sujeta método de ensayo resonador de línea de cinta para la constante dieléctrica de un material de alta frecuencia. Este método tiene un alto grado de repetibilidad, así como un excelente rendimiento para el control de calidad interno para garantizar la fabricación de productos laminados de alta frecuencia consistentes, considerando que tiene algunos problemas potenciales con anisotropía y módulo de compresión del material bajo prueba, conocer este método ayudará al diseñador de entender el comportamiento eléctrico de estos materiales con diferentes diseños de circuitos y aplicaciones.

La banda X sujeta prueba de línea de cinta dará resultados de Dk y Df para un material bajo prueba. Estos resultados pueden o no correlacionarse bien con el mismo material utilizado en una aplicación de microcinta, como un ejemplo, donde el entorno electromagnético de la aplicación circuito es muy diferente de la prueba de línea de cinta. (Rogers Corporation, 2017).

2.7.1.1. Roger - RO4003C™

El dieléctrico Rogers se caracteriza por determinadas constantes dieléctricas, factor de disipación bajo, estabilidad frente a la temperatura, propiedades mecánicas y térmicas específicas, aplicación en microondas, aplicación en Radio Frecuencia.

En la Figura 19-2 se observa un circuito del material RO4003C el cual proporciona un control estricto sobre la constante dieléctrica y las bajas pérdidas al tiempo que utiliza el mismo método de procesamiento que el epoxi / vidrio estándar, pero a una fracción del costo de los laminados de microondas convencionales. A diferencia de los materiales de microondas basados en PTFE, no se requieren tratamientos especiales de orificios pasantes o procedimientos de manipulación. Los circuitos de alta frecuencia requieren materiales de sustrato que tienen un control estricto de la constante dieléctrica, así como de pequeñas pérdidas. Los materiales que cumplen estos requisitos han sido tradicionalmente un precio mucho más alto que las tablas de epoxy / de vidrio convencionales. La aparición del mercado de alta frecuencia comercial ha provocado una fuerte necesidad de equilibrar el rendimiento, la fabricación y el costo. RO4003C Rogers™ Material de la alta frecuencia de puente, proporcionando un control estricto sobre la constante dieléctrica y baja pérdida, materiales RO4003C son de vidrio tejida patentada reforzada de hidrocarburos / cerámica con el rendimiento eléctrico de PTFE de vidrio / tejido y la fabricación de epoxy / vidrio. (Rogers Corporation, 2017).



Figura 19-2: Roger - RO4003C™

Fuente: (Rogers Corporation, 2017).

Una evaluación de la pérdida de inserción, ver Figura 20-2, para una línea de transmisión de microcinta 50Ω se llevó a cabo en varios materiales. Los materiales de rango seleccionado son estándar, los más sofisticados laminados basados en PTFE (GX y RO3003™). El objetivo de la evaluación fue cuantificar las pérdidas del circuito en los distintos tipos de materiales. (Rogers Corporation, 2017).

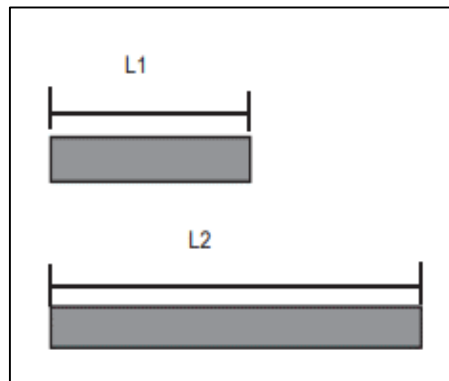


Figura 20-2: Pérdida de datos de inserción

Fuente: (Rogers Corporation, 2017).

$$Pérdida\ ins = \frac{S_{21}(L2) - S_{21}(L1)}{L2 - L1}$$

Ecuación 4-2

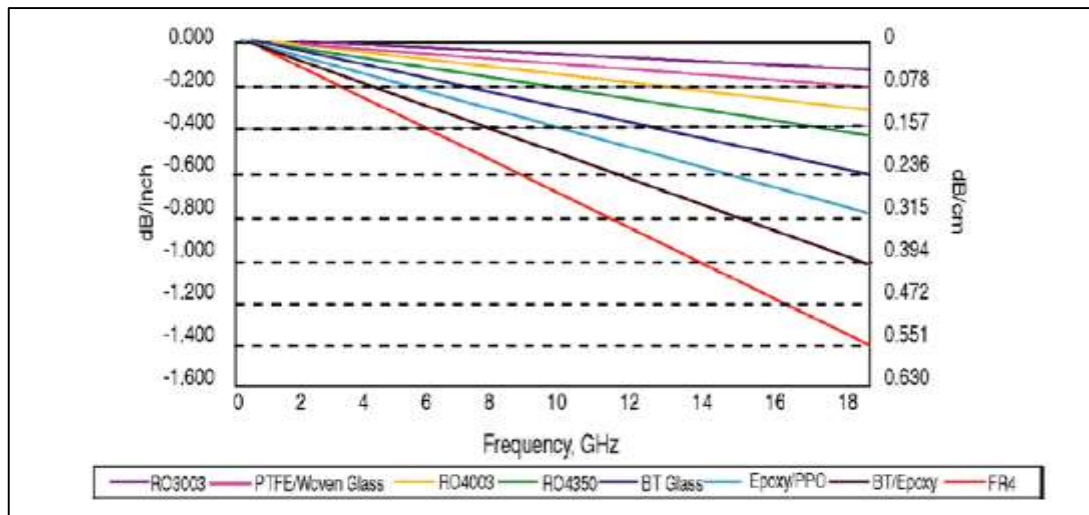


Figura 21-2: Datos medidos de pérdida de inserción de la Microstrip

Fuente: (Rogers Corporation, 2017).

Como se observa en la Figura 21-2 gracias a la pérdida de inserción se podrá comprender de mejor manera las limitaciones de las frecuencias de cada material, los materiales seleccionados y anunciados ϵ_r se muestran en la tabla 5-2.

Al observar en la tabla se observa que el material RO4003C proporciona una pérdida de 3.38 comparada con la pérdida del material RO3003 que es 3.0, y el material GX. Además, el material BT va de gran aumento de 3.7 a 4.0.

El material Epoxy/PPO, es 4,5 veces más severo que el laminado RO4003C, lo cual deben tenerse en cuenta con el fin de reducir el tiempo de ciclo del diseño. (Rogers Corporation, 2017).

Tabla 5-2: Materiales de grado comercial

MATERIAL	ADVERTISED ϵ_r
RO3003 TM	3.0
GX (PTFE)	2.2 – 2.6
R04003C	3.38
BT	3.7 – 3.9
Epoxy/PPO	3.95
BT/Epoxy	4.0
Difunctional Epoxy	4.5

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Fuente: HERNÁNDEZ José, 2019

2.7.2. Conectores SMA

Son conectores sub-miniatura que proporcionan una gran eficacia eléctrica de 0 a 12.4 GHz. El diseño de conectores SMA ha sido utilizado para acomodar muchas aplicaciones de interconexión en la gama de microondas con un rango de frecuencias de operación de 0 a 12.4 GHz, tiene una impedancia de 50 Ohm. Las especificaciones eléctricas y el material de diseño se lo pueden observar en la tabla 6-2. Sus aplicaciones más comunes son: satélites, microondas, instrumentos de precisión, audio y video, proporcionando una interface mínima de atenuación y un bajo VSWR (ROE). (Conexcon, 2016).

Tabla 6-2: Especificaciones de los Conectores SMA

ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS		MATERIALES	
IMPEDANCIA NOMINAL	Variable	METÁLICO	Latón con diferentes acabados (dorado, plateado, niquelado, estañado y cromado en negro)
FRECUENCIA DE APLICACIÓN	0 a 12.4 GHz	AISLANTE	Teflón, Delrin, ABS, PBT y Polipropileno
VOLTAJE DE TRABAJO	500 VRMS nivel del mar		
RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	5000MOhmios		
RIGIDEZ DIELÉCTRICA	1500 VRMS nivel del mar		

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Fuente: (Conexcon, 2016).

2.7.2.1. Conector SMA Hembra

Como se observa en la Figura 22-2 es un conector de RF tipo SMA Hembra que se utiliza para el borde de impreso del material, es ideal para impresos de 1.6mm de espesor.

Sus características principales de este tipo de conectores son:

- [illegible]

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se detalla la etapa de diagnóstico, análisis estadístico y el diseño de las pistas del set de Multiplicadores de Frecuencia X2, X3 y X5 de altas frecuencias. Con esto indicaremos además que cada set constara de tres Multiplicadores de Frecuencia con Tecnología MMIC para trabajar dentro de bandas C, X y Ku que operan en el rango de frecuencia de 4 a 8 GHz, 8 a 12 GHz y 12 a 18 GHz respectivamente. Este tipo de dispositivos son de gran importancia en los sistemas de telecomunicaciones por la utilización de señales de frecuencia de microondas, además estos dispositivos serán entregados en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH para mejorar el proceso de enseñanza aprendizaje de los estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones.

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1. *Materiales*

En la actualidad existen muchos tipos de materiales para aplicaciones de altas frecuencias, pero habiendo tomado en cuenta las necesidades del presente proyecto y el rendimiento eléctrico del material se ha decidido utilizar Roger RO4003C para la ejecución y implementación de las pistas de los multiplicadores de frecuencia MMIC, este material provee características eléctricas aptas para realizar placas de circuito impreso con procesos de grabado que reduzcan los costos de fabricación.

- Roger – RO4003C™
- Conectores SMA Hembra 50Ω
- Pigtailes Coaxial RG316 Male to Male
- Multiplicadores de frecuencia MMIC:
 - Multiplicador MMIC X2 KSX2-24+

- Multiplicador MMIC X3 RMK-3-123+
- Multiplicador MMIC X5 RMK-5-83+
- Dremel, discos de corte, brocas
- Cautín tipo lápiz, estaño y pasta.

3.1.2. Equipos

Los equipos que se detallan a continuación se encuentran disponibles en el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas, para el uso y práctica que requieran los estudiantes y docentes de Escuela de Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes de la FIE-ESPOCH.

- RF/Microwave Signal Generator: Anritsu MG3690C
- Spectrum Analyzer: Anritsu MS2724C

3.2. MÉTODOS E IMPLEMENTACIÓN DEL SET DE MULTIPLICADORES

3.2.1. Métodos

Para desarrollar el diseño e implementación de los Multiplicadores de Frecuencia de altas frecuencias propuestos en el presente trabajo se aplicarán los métodos: descriptivo, de laboratorio y transversal. Los cuales se basan en el reconocimiento del objeto o caso de estudio por lo que a través del planteamiento del problema se resolverán gradualmente las interrogantes.

Después de la familiarización con las tecnologías MMIC y el diseño e implementación de los dispositivos, se realizará el análisis de los datos obtenidos para dar a conocer de su comportamiento en altas frecuencias, y así concluir si la implementación del set electrónico fue satisfactoria.

3.2.1.1. Situación Problemática

En la actualidad las telecomunicaciones están en constante avance por consiguiente se debe seguir dotando de equipos y materiales más avanzados para el tratamiento y estudio de las señales de microondas para mejorar el aprendizaje de las mismas con lo cual al momento el laboratorio de

comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH que es donde más nos familiarizamos con este tipo de señales tiene un deficiencia en lo que es material idóneo para trabajar a altas frecuencias, con esto nace la necesidad de implementar dispositivos Multiplicadores de Frecuencia de alta frecuencia utilizando tecnología MMIC para que aporten al aprendizaje y formación de nuevos profesionales en telecomunicaciones.

3.2.1.2. Diagnóstico

Las encuestas son realizadas a los estudiantes de la Facultad de Informática y Electrónica de la Carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la ESPOCH, de los niveles quinto, sexto, séptimo y octavo semestre por el motivo de que a partir de estos niveles reciben asignaturas afines al proyecto. El objetivo es determinar la factibilidad y el impacto que tendrá implementar un set de Multiplicadores de Frecuencia de Alta Frecuencia en el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas de la FIE-ESPOCH.

3.2.1.3. Población y Muestra

De acuerdo con los datos obtenidos de la Escuela de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, hay un total de 485 estudiantes legalmente matriculados a la fecha, de los cuales 188 son alumnos de quinto a decimo semestre de la carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes y 297 son alumnos de primer a cuarto semestre de la nueva malla académica de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones. Por lo tanto, se ha tomado como población los 188 estudiantes de los niveles superiores.

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{i^2(N - 1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}$$

Ecuación 1-3

Donde:

n : tamaño muestral

N : tamaño de la población

Z_α : valor correspondiente a la distribución de Gauss (nivel de confianza)

p : prevalencia esperada del parámetro a evaluar en caso de ser desconocido ($p = 0,5$), que hace mayor el tamaño muestral

q : $1 - p$ (si $p = 70\%$, $q = 30\%$)

i : error que se prevé cometer

Entonces:

Partiendo de la Ecuación 1-3 tomando en cuenta los 188 estudiantes de la población y con un nivel de confianza de 94%;

$$n = \frac{Z_\alpha^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{i^2(N-1) + Z_\alpha^2 \cdot p \cdot q} = \frac{1,881^2 \cdot 188 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,06^2(1,881^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5)} = 106,753$$

$$n = 107$$

Finalmente, en base a los cálculos realizados se ha determinado que la encuesta se debe realizar a 107 estudiantes de los niveles de quinto a decimo semestre de la carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes.

3.2.1.4. Diseño estadístico para el análisis de la ganancia

La selección de los niveles altos y bajos de la frecuencia y potencia va a influir de gran manera en el análisis de resultados de los multiplicadores de frecuencia puesto que estas condiciones alteran el desempeño de los dispositivos al momento de manipularlos.

3.2.1.4.1. Diseño estadístico para el análisis de la ganancia del multiplicador de frecuencia X2 K SX2-24+

La tabla 1–3 muestra los valores referentes a los factores y niveles tomados en cuenta para el análisis estadístico de la ganancia de los del Multiplicador de Frecuencia X2 K SX2-24+. De igual manera podemos observar la tabla 2-3 y 3-3 que muestra los factores y niveles que se tomaron en cuenta para el análisis estadístico de los Multiplicadores de frecuencia X3 RMK-3-123+ y X5 RMK-5-83+ respectivamente.

Tabla 1-3: Factores y niveles de entrada del Multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+

Factor	Unidades	Niveles		Ganancia
		Bajo	Alto	
Frecuencia de Entrada X1	GHz	5	10	dB
Potencia X2	dBm	11.5	18.5	

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Partiendo de las características que nos brinda el Datasheet del Multiplicador X2 KSX2-24+ observamos los niveles altos y bajos que disponemos tanto en frecuencia como en potencia de entrada del dispositivo, por lo cual notamos en el caso de la frecuencia su nivel alto es de 10 GHz mientras que su nivel bajo es de 5GHz. Además, podemos notar que en la otra variable que en este caso es la potencia tenemos como nivel alto de 18.5 dBm mientras que su nivel bajo es de 11.5 dBm. Se aplicó un diseño experimental factorial multinivel 2^2 , y se controló el efecto rendimiento del dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ a través de la variable ganancia, según la Tabla 1-3. Los resultados fueron procesados con el software Statgraphics™ Centurion para su análisis.

3.2.1.4.2. *Diseño estadístico para el análisis de la ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+*

Tabla 2-2: Factores y niveles de entrada del Multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+

Factor	Unidades	Niveles		Ganancia
		Bajo	Alto	
Frecuencia de Entrada X1	GHz	2.2	4	dB
Potencia X2	dBm	13	17	

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la tabla 2-3 se muestra la denominación que se va a tomar en cuenta para el análisis estadístico del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ lo cual se obtuvo del datasheet del multiplicador, damos a conocer que de igual manera que la tabla anterior en esta caso también se toma en cuenta los niveles altos y bajos en los que opera este multiplicador de frecuencia en este caso los factores a tomar en cuenta son también la frecuencia de entrada y la potencia, la frecuencia en su nivel alto es de 4 GHz mientras que en su nivel bajo es de 2.2 GHz, de igual manera la potencia en su nivel alto es de 17 dBm mientras que su nivel bajo es de 13 dBm. Se aplica un diseño experimental factorial multinivel 2^2 , y se controló el efecto rendimiento del dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ a través de la variable ganancia, según la Tabla 2-3. Los resultados fueron procesados con el software Statgraphics™ Centurion para su análisis.

3.2.1.4.3. Diseño estadístico para el análisis de la ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+

Tabla 3-2: Factores y niveles de entrada del Multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+

Factor	Unidades	Niveles		Ganancia
		Bajo	Alto	
Frecuencia de Entrada X1	GHz	1	1.6	dB
Potencia X2	dBm	7	11	

Fuente: (Mini-Circuits, 2019)

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la tabla 3-3 se muestra la denominación del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+, la cual muestra las características que se van a tomar en cuenta para el análisis estadístico del multiplicador de frecuencia, se utilizara como factores la frecuencia de entrada y la potencia que soporta el dispositivo multiplicador, en el factor de frecuencia de entrada tenemos de igual manera niveles altos y bajos en el caso del nivel alto es de 1.6 GHz mientras que el nivel bajo es de 1 GHz, en el factor de potencia de la misma manera tenemos el nivel alto que es de 11 dBm mientras que el nivel bajo es de 7 dBm. Se aplicó un diseño experimental factorial multinivel 2^2 , y se

controló el efecto rendimiento del dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ a través de la variable ganancia, según la Tabla 3-3. Los resultados fueron procesados con el software Statgraphics™ Centurion para su análisis.

3.2.2. Implementación del set de multiplicadores

Para detallar las técnicas de diseño utilizadas en el diseño de las pistas microstrip de los multiplicadores de frecuencia con tecnología MMIC. Se utilizará el software Ansoft Designer, ya que nos permite seleccionar los parámetros específicos que se necesitan para el diseño de las pistas brindando la mayor precisión en los resultados finales. A continuación, se muestra el procedimiento a seguir para el diseño de las pistas de los dispositivos multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5.

3.2.2.1. Diseño de pistas de los multiplicadores de frecuencia con tecnología MMIC X2, X3 y X5.

Para el diseño de las pistas de los multiplicadores de frecuencia con tecnología MMIC se ha dispuesto elegir dispositivos que trabajen en el orden de las microondas. Por esta razón se ha decidido implementar el set de multiplicadores de frecuencia en los modelos X2 KSX2-24+, X3 RMK-3-123+ y X5 RMK-5-83+, los cuales cumplen con los requerimientos planteados. Se va a empezar utilizando el software Ansoft Designer para realizar el diseño de las pistas de los dispositivos multiplicadores de frecuencia, donde se ingresa las características que muestra el Datasheet del dispositivo, a la vez introduciendo que el material a utilizar para el diseño e impresión de la pista será en Rogers RO4003C. Las pistas fueron modificadas en las secciones de tierra para tener una mayor apertura al momento de soldar la conexión que enlace la cara superior con la inferior del diseño, de igual manera se realizó una modificación en las entradas de los puertos, debido a que debemos acoplarlos a 50Ω para las pruebas respectivas que se realizaran una vez implementados los dispositivos. Empezaremos conociendo las características que nos brinda cada uno de estos dispositivos, estos multiplicadores van a trabajar en las bandas C, X y Ku respectivamente ya que sus frecuencias de operaciones están dentro del margen de estas bandas las cuales son de gran utilidad en el ámbito de las telecomunicaciones, la banda C por un lado está enfocada a las comunicaciones por satélite, dispositivos Wifi y telefonía inalámbrica mientras que la banda X se encuentra enfocada a aplicaciones de radar y redes inalámbricas, por

otro lado banda Ku se enfocada a servicios de difusión por satélite (BSS) y es una de las bandas más utilizadas para las señales de televisión.

3.2.2.1.1. Multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ (Entrada 5-10GHz / Salida 10-20GHz)

En la figura 1-3, se observa el diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ en su vista superior, este dispositivo operara en el rango de frecuencia de 5 a 10GHz de entrada y mostrara a su salida una frecuencia de 10 a 20 GHz, este multiplicador de frecuencia trabajara en la banda Ku (12 a 18GHz), puesto que se encuentra dentro del rango de frecuencia en la que opera esta banda de microondas, como podemos notar en la figura 1-3 no se encuentra ubicados los puertos en su entrada y salida debido a que en el diseño de pistas no podemos realizar una simulación, los resultados de este multiplicador de frecuencia se los podrá evidenciar una vez implementado.

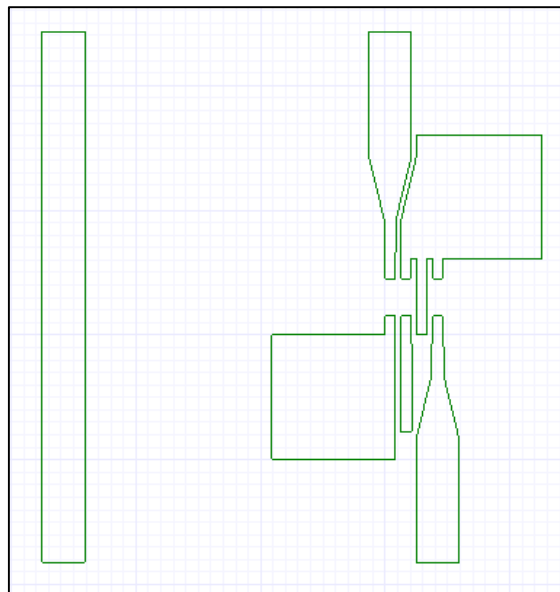


Figura 1-3: Diseño de pista del Multiplicador de Frecuencia X2 KSX2-24+ (Vista superior)

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 2-3, se observa la denominación de las capas en las cuales se va a trabajar para el diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+, se puede evidenciar que el

material dieléctrico utilizado es Rogers RO4003C que tiene una constante dieléctrica de 3.38 y un grosor de 1.524mm. Para el diseño de la pista del multiplicador de frecuencia se trabajará en la capa superior que es la capa de señal asignada antes de empezar con la elaboración de las pistas, este proceso de ubicación y selección de las capas en las que vamos a elaborar los diseños de las pistas se realizara para la ejecución de los tres modelos de multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5.

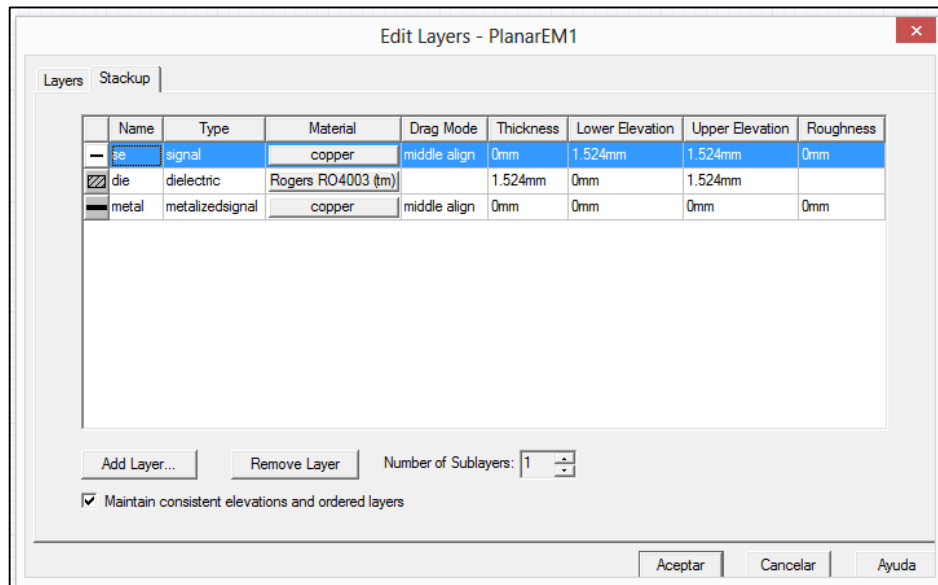


Figura 2-3: Selección de las capas de material idóneo para el multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 3-3, se observa el cálculo de la línea microstrip para acoplar los puertos de entrada y salida del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ a 50Ω , este acoplamiento nos permitirá ubicar los conectores hembra de 50Ω , y con esto lograr un perfecto acople de impedancias para realizar las mediciones, de igual manera este proceso de cálculo se realizará en la ejecución de los tres tipos de multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5.

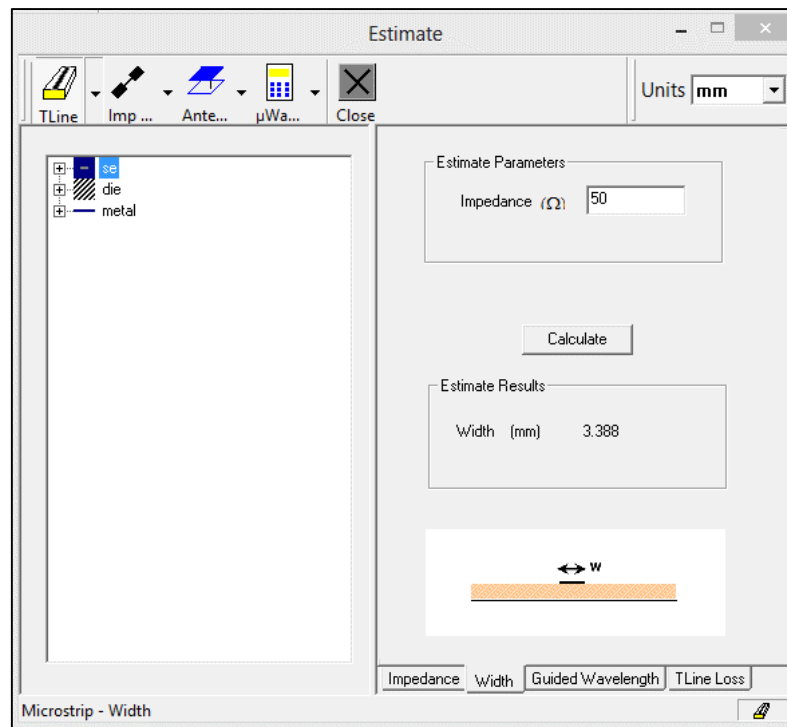


Figura 3-3: Cálculo de línea microstrip a 50Ω para los puertos de entrada y salida del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 4-3, se observa la distribución de las coordenadas de la conexión directa que nos permite comprobar el correcto funcionamiento de los equipos de medición que se utilizan en el laboratorio de comunicación y microondas de la FIE-ESPOCH. Este puerto de entrada y salida este acoplado a 50Ω , puesto que a este acoplamiento funcionan los puertos de los equipos de medición, esta distribución se da gracias al cálculo antes realizado en el software Ansoft Designer como se pudo observar en la figura 3-3, y luego se plasma en el plano cartesiano del software para generar el diseño deseado.

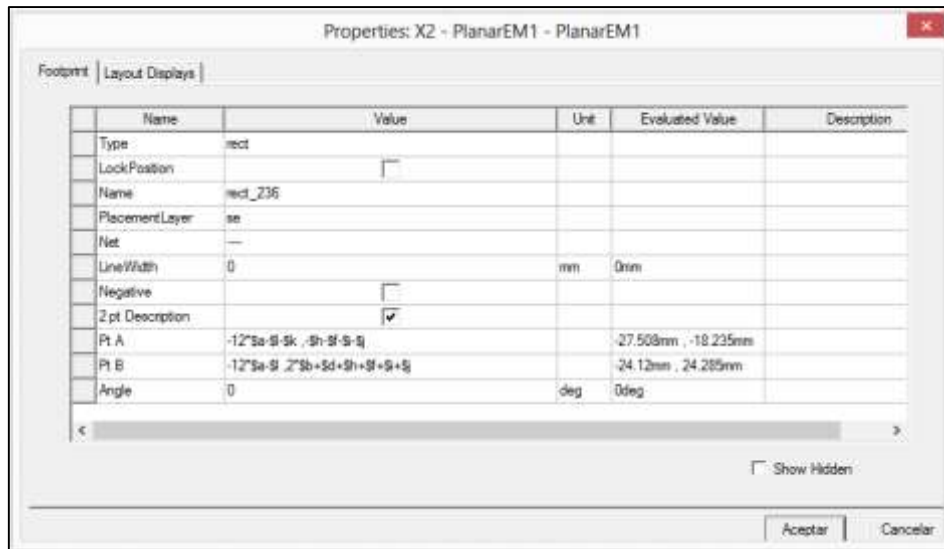


Figura 4-3: Coordenadas cartesianas del puerto directo del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 5-3, se muestra la denominación en el plano cartesiano del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+, se realizó una expansión de 10 mm en el plano de tierra puesto que requeríamos de un área mayor a la mostrada en el Datasheet para realizar las perforaciones que permitan conectar la capa superior con la inferior del material, estas perforaciones tendrán un diámetro de 0.05mm y serán realizadas una en cada área de tierra. Por otra parte, en los pines de entrada y salida del multiplicador X2 se realizó un acoplamiento de impedancias a 50Ω para la ubicación de los puertos de conexión que posteriormente nos permitirán conectar el dispositivo a los equipos de medición.

Properties: X2 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Type	poly			
LockPosition	<input type="checkbox"/>			
Name	poly_57			
PlacementLayer	ps			
Net				
LineWidth	0	mm	0mm	
Negative	<input type="checkbox"/>			
Pt0	$5a+5c/2+5b+5d$		1.27mm, 5.05mm	
Pt1	$5a+5c/2+5b+5d+9+8$		1.27mm, 5.205mm	
Pt2	$5a/2+5c/2+(5a/2+5g/2+5c)/2+5b+5d+9+9+5$		2.4815mm, 14.285mm	
Pt3	$5a/2+5c/2+(5a/2+5g/2+5c)/2+5b+5d+9+4+8$		2.4815mm, 15.99mm	
Pt4	$14.5*5a+3*5c/2+5b+5d+9+4+8$		12.55mm, 15.99mm	

Show Hidden

Aceptar Cancelar

Figura 5-3: Coordenadas cartesianas del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 6-3, se muestra el resultado final del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ dando a conocer las medidas finales que constara el diseño al igual la separación que existe entre el acoplamiento directo con la parte que entra en operación con el dispositivo MMIC.

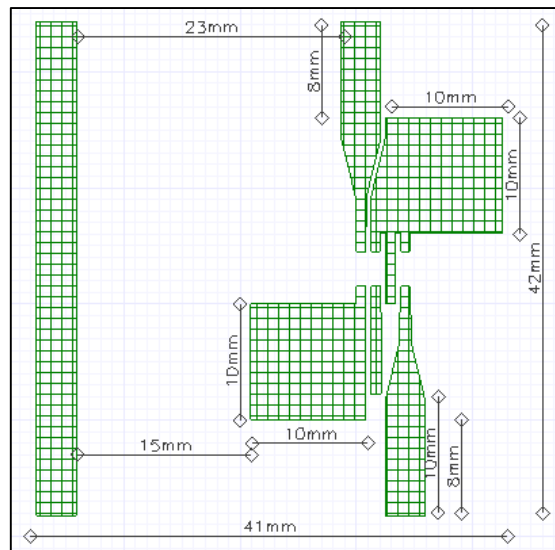


Figura 6-3: Diseño final de pista del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ (Entrada 5-10GHz/Salida 10-20GHz).

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 7-3, muestra el diseño de las pistas del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ importado ha AutoCAD, luego de esto pasará a ser impreso mediante proceso de rebelado a la placa de Rogers RO4003C, una vez ejecutado este paso se procederá a retirar el material conductor en exceso mediante la utilización de ácido sulfúrico, hasta tener el diseño final impreso listo para la ubicación del dispositivo multiplicador de frecuencia X2 y sus conectores de entrada y salida.

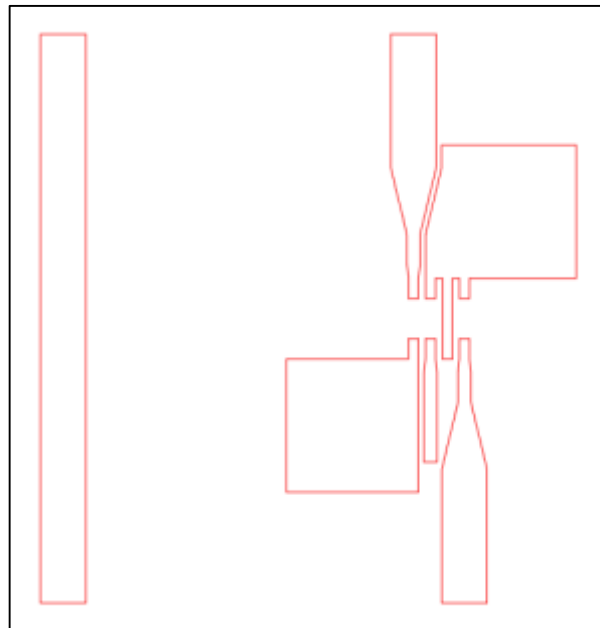
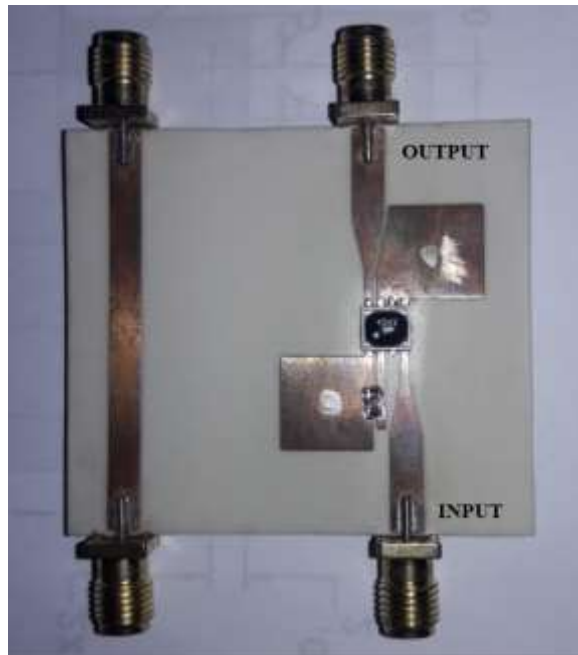


Figura 7-3: Diseño final de pista del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ en AutoCAD.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 8-3, se muestra el resultado final de la pista del multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ en la placa de Rogers RO4003C, además se observa que ya ha sido incrustado y soldado los conectores SMA Hembra al igual que el dispositivo multiplicador de frecuencia X2.



a)



b)

Figura 8-3: Dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSC2-24+ implementado. a) Vista superior b) Vista posterior

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

3.2.2.1.2. *Multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ (Entrada 2.2-4 GHz / Salida 6.6-12GHz)*

En la figura 9-3, se observa el diseño de la pista para el multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ el cual trabaja a una frecuencia de entrada de 2.2 a 4 GHz y nos dotara a partir de una conversión una frecuencia de salida de 6.6 a 12 GHz, este multiplicador de frecuencia trabajara en la banda X (8 a 12GHz), puesto que está dentro del rango de frecuencia en la que opera esta banda de microondas, a continuación se puede observar la denominación de los puntos de conexión, y las dimensiones que va a tener el diseño de las pistas del dispositivo, en los puertos de entrada y salida como se puede evidenciar no existe ubicados los puertos para simulación puesto que en la elaboración de pistas en el Software Ansoft Designer no se permite simular, por lo tanto esto se llevara a cabo una vez implementado el diseño de las pistas del dispositivo multiplicador de frecuencia.

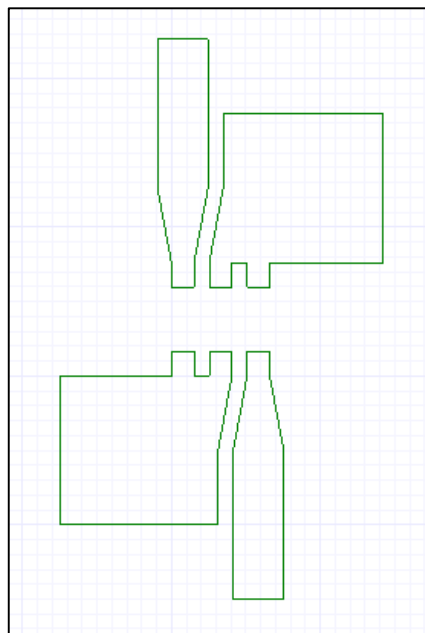


Figura 9-3: Diseño de pista del Multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ (Vista superior).

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 10-3, se observa la denominación en el plano cartesiano de los puntos que forman la pista del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+, en este diseño también se realizó una expansión en los planos de tierra de 10mm y una perforación de 0.05mm que permita conectar la

capa superior con la posterior de tierra, además se realizó el acoplamiento de impedancias de los puertos de entrada y salida a 50Ω para luego montar los conectores que nos permitan conectar el dispositivo con los equipos de medición.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Type	poly			
LockPosition	<input type="checkbox"/>			
Name	poly_222			
PlacementLayer	sil			
Net	---			
LineWidth	5	mm	5mm	
Negative	<input type="checkbox"/>			
P0	-7.514 ; -10	mm	-7.514mm ; -10mm	
P1	3.126 ; -10	mm	3.126mm ; -10mm	
P2	3.126 ; -5	mm	3.126mm ; -5mm	
P3	4.06 ; 0	mm	4.06mm ; 0mm	
P4	4.06 ; 1.65	mm	4.06mm ; 1.65mm	
P5	2.54 ; 1.65	mm	2.54mm ; 1.65mm	
P6	2.54 ; 0	mm	2.54mm ; 0mm	
P7	1.52 ; 0	mm	1.52mm ; 0mm	
P8	1.52 ; 1.65	mm	1.52mm ; 1.65mm	
P9	0 ; 1.65	mm	0mm ; 1.65mm	
P10	0 ; 0	mm	0mm ; 0mm	
P11	-7.514 ; 0	mm	-7.514mm ; 0mm	

Figura 10-3: Coordenadas cartesianas del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 11-3, se observa el diseño final de las pistas del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+, como podemos apreciar estas son las dimensiones que quedara finalmente el diseño de las pistas del dispositivo una vez implementado.

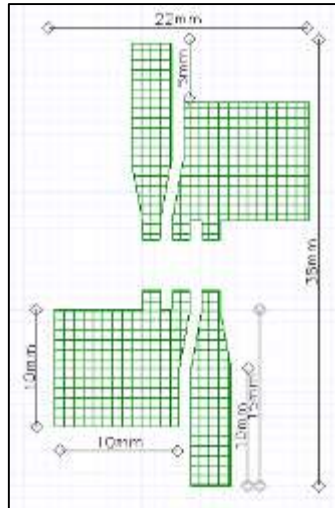


Figura 11-3: Diseño final de la pista del multiplicador de frecuencia X3 RMK-123+.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 12-3, se observa el diseño de las pistas del dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ importadas al Software AutoCAD, luego de esto pasará a ser impreso mediante proceso de rebelado en la placa de Rogers RO4003C, una vez ejecutado este paso se procederá a retirar el material conductor en exceso mediante la utilización de ácido sulfúrico para la obtención del resultado final de la pista.

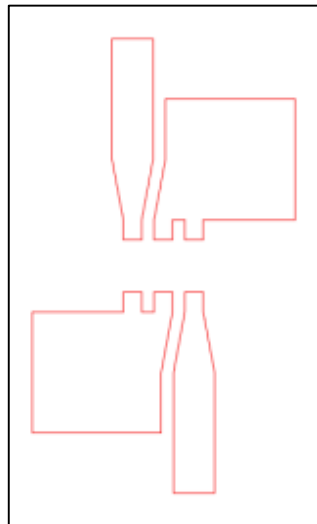


Figura 12-3: Diseño de pistas del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ con extensión AutoCAD.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 13-3, se muestra el resultado final de la pista del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ implementado en la placa de Rogers RO4003C, además ya ha sido incrustado y soldado los conectores SMA Hembra en sus puertos de entrada y salida al igual que el dispositivo multiplicador de frecuencia X3.

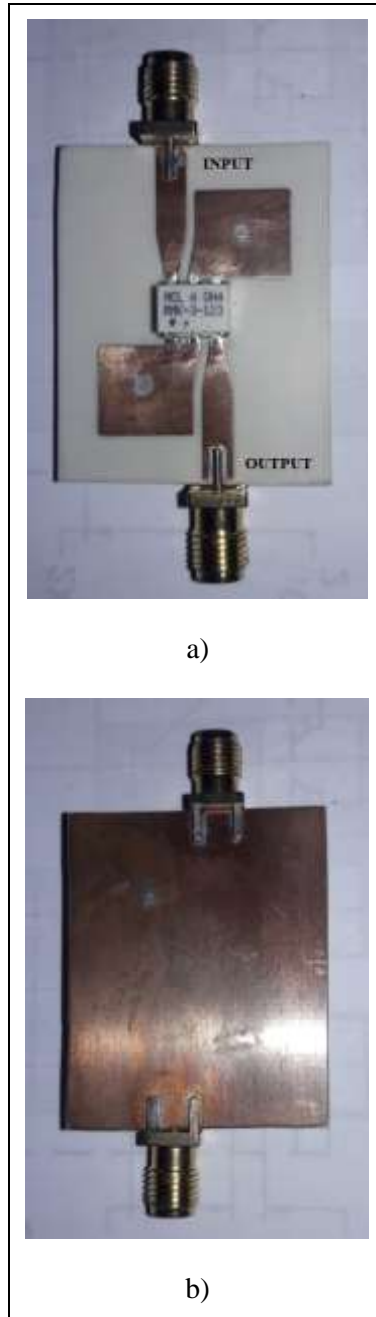


Figura 13-3: Dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ implementado. a) Vista superior b) Vista posterior.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

3.2.2.1.3. Multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ (Entrada 1-1.6 GHz / Salida 5-8GHz)

En la figura 14-3, se observa el diseño de la pista para el multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ el cual trabaja a una frecuencia de entrada de 1 a 1.6 GHz y nos dotara a partir de una conversión una frecuencia de salida de 5 a 8 GHz, este multiplicador de frecuencia trabajara en la banda C (4 a 8GHz), puesto que está dentro del rango de frecuencia en la que opera esta banda de microondas, a continuación se puede observar la denominación de los puntos de conexión, y las dimensiones que va a tener el diseño de las pistas del dispositivo, en los puertos de entrada y salida como se puede evidenciar no existe ubicados los puertos para simulación puesto que en la elaboración de las pistas en el Software Ansoft Designer no se permite simular, por lo tanto esto se llevará a cabo una vez implementado el diseño de las pistas del dispositivo multiplicador de frecuencia X5.

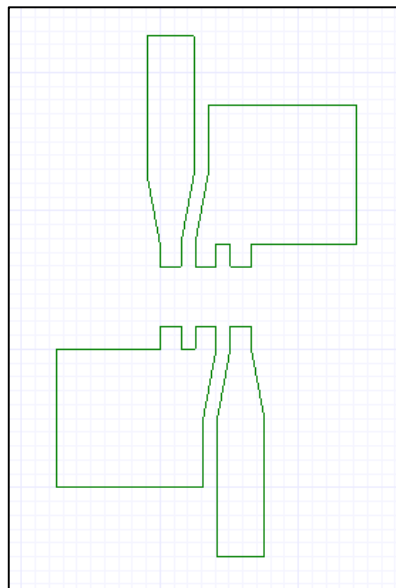


Figura 14-3: Diseño de pista del Multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ (Vista superior).

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 15-3, se observa la denominación en el plano cartesiano de los puntos que forman la pista del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+, en este diseño también se realizó una expansión en los planos de tierra de 10mm y una perforación de 0.05mm que permita conectar la capa superior con la posterior de tierra, además se realizó el acoplamiento de impedancias de los

puertos de entrada y salida a 50Ω para luego montar los conectores que nos permitan conectar el dispositivo con los equipos de medición.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Type	poly			
Lock Position	<input type="checkbox"/>			
Name	poly_224			
Placement Layer	ss			
Net	—			
LineWidth	0	mm	0mm	
Negative	<input checked="" type="checkbox"/>			
Pt0	2.54, 5.97	mm	2.54mm, 5.97mm	
Pt1	4.06, 5.97	mm	4.06mm, 5.97mm	
Pt2	4.06, 7.62	mm	4.06mm, 7.62mm	
Pt3	5.08, 7.62	mm	5.08mm, 7.62mm	
Pt4	5.08, 5.97	mm	5.08mm, 5.97mm	
Pt5	6.6, 5.97	mm	6.6mm, 5.97mm	
Pt6	6.6, 7.62	mm	6.6mm, 7.62mm	
Pt7	14.2, 7.62	mm	14.2mm, 7.62mm	
Pt8	14.2, 17.62	mm	14.2mm, 17.62mm	
Pt9	3.474, 17.62	mm	3.474mm, 17.62mm	
Pt10	3.474, 12.62	mm	3.474mm, 12.62mm	
Pt11	2.54, 7.62	mm	2.54mm, 7.62mm	

Figura 15-3: Coordenadas cartesianas del diseño de la pista del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 16-3, se observa el diseño final de las pistas del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+, como podemos apreciar estas son las dimensiones que quedara finalmente el diseño de las pistas del dispositivo una implementado.

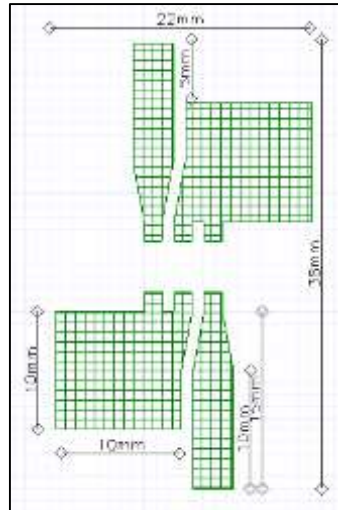


Figura 16-3: Diseño final de la pista del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 17-3, se observa el diseño de las pistas del dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ importadas al Software AutoCAD, luego de esto pasará a ser impreso mediante proceso de rebelado a la placa de Rogers RO4003C, una vez ejecutado este paso se procederá a retirar el material conductor en exceso mediante la utilización de ácido sulfúrico para la obtención del resultado final de la pista.

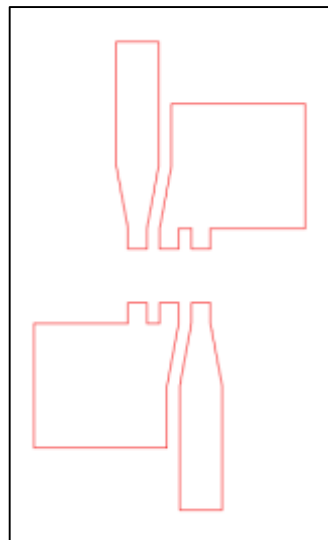


Figura 17-3: Diseño de pistas del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ con extensión AutoCAD.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En la figura 18-3, se muestra el resultado final de la pista del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ en la placa de Rogers RO4003C, además se observa que ya ha sido incrustado y soldado los conectores SMA Hembra al igual que el dispositivo multiplicador de frecuencia X5.

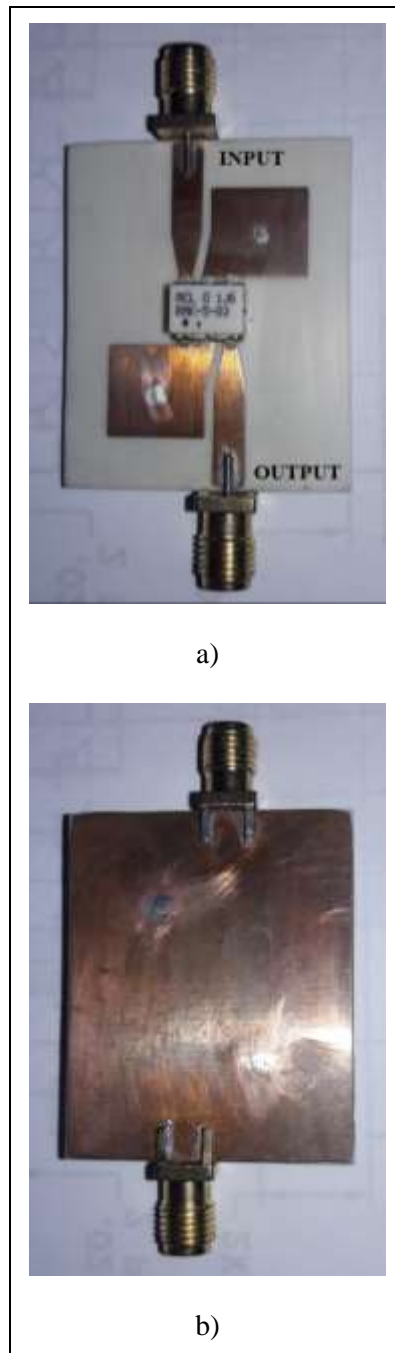


Figura 18-3: Dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ implementado. a) Vista superior b) Vista inferior.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se detallan los resultados de la encuesta realizada a los estudiantes de la Facultad de Informática y Electrónica, Carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, acerca del impacto que tendrá dotar de un set de Multiplicadores de Frecuencia para las Bandas C, X, y Ku de alta frecuencia utilizando Tecnología MMIC para el laboratorio de comunicaciones y microondas en la FIE-ESPOCH.

Se muestra también los resultados del análisis de la ganancia de los dispositivos multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5 mediante el análisis estadístico que fue procesado por el software Statgraphics™ Centurion.

Y al concluir se detallaran los resultados de las mediciones elaboradas con la ayuda del equipo Generador de señal RF (Tx) y Analizador de espectro (Rx) del set de Multiplicadores de Frecuencia X2, X3 y X5, el mismo que está compuesto por nueve Multiplicadores de Frecuencia con tecnología MMIC para trabajar en las bandas C (4 a 8GHz), X (8 a 12GHz) y Ku (12-18GHz), este proceso fue ejecutado en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH, estos resultados serán valorados posteriormente en el software Matlab.

4.1.RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO DE LA ENCUESTA

Al valorar los resultados de la encuesta realizada a 107 estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes de la ESPOCH, referente al impacto que tendrá dotar de dispositivos Multiplicadores de Frecuencia en el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas de la Facultad de Informática y Electrónica. Las preguntas realizadas referentes a que si los estudiantes de la escuela ¿Tienen conocimiento de que es un laboratorio de comunicaciones y microondas? Pregunta número 1, ¿Les gustaría que la escuela disponga de un laboratorio para

estos fines? Pregunta número 4 y de si ¿Le ayudaría en el aprendizaje, un laboratorio de Microondas que complementen con la práctica los conocimientos adquiridos? Pregunta número 5, da conocer que los estudiantes encuestados en su gran mayoría les gustaría disponer de este tipo de laboratorios para poder complementar los conocimientos adquiridos en clase, mientras que los estudiantes que no tienen conocimiento de la funcionalidad que nos ofrecerían estos laboratorios es bastante baja, estos detalles podemos observar en el gráfico 1-4.

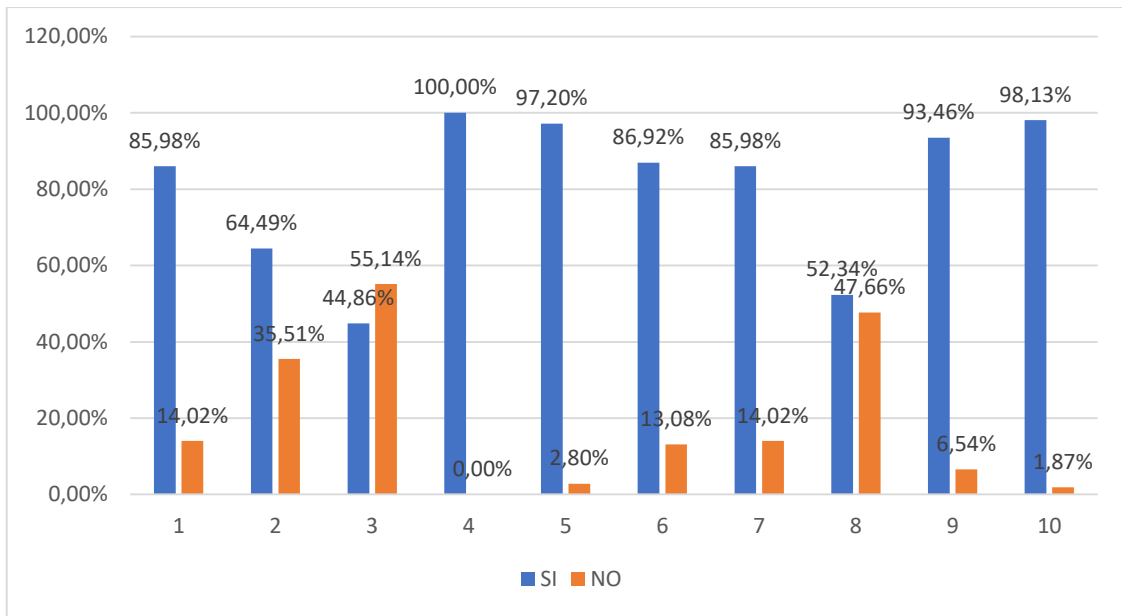


Gráfico 1-4: Resultados de la encuesta realizada sobre el impacto que tendrá dotar de dispositivos Multiplicadores de Frecuencia en el Laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Podemos observar que preguntas como si ¿Conoce si la facultad tiene laboratorios didácticos para procesos de enseñanza aprendizaje de microondas? Pregunta número 2, y si ¿Ha recibido clases en este tipo de laboratorios en procesos de enseñanza aprendizaje? Pregunta número 3, da a conocer que de los estudiantes que conocen la existencia de este tipo de laboratorio disponible en la facultad la mitad de ellos no ha recibido clases en estos laboratorios por obvias razones. Podemos dar a conocer que de igual manera la gran mayoría de estudiantes encuestados ¿Conoce de la existencia y ha utilizado los equipos Generador de Señal y Analizador de Espectro disponibles en la facultad? Pregunta número 6, para el tratamiento y estudios de señales de microondas, detalles mostrados en el gráfico 1-4.

Por otra parte, podemos dar a conocer referente a la pregunta número 7 si ¿Ha utilizado estos equipos disponibles en la facultad para el análisis de señales?, la gran mayoría a manipulado estos

equipos, mientras que los estudiantes que si ¿Saben utilizar de manera correcta este tipo de equipos? Pregunta número 8, observamos que la mitad de los estudiantes encuestados saben manipular de manera correcta estos equipos mientras la otra mitad no sabe hacerlo, y esto puede ser por la falta de practica en este tipo de laboratorios, lo cual genera una falencia que debe ser muy tomada en cuenta por las autoridades de la Carrera.

Para conocer qué tan solvente será el proyecto se preguntó si ¿Les gustaría a los estudiantes tener disponibilidad de Dispositivos Multiplicadores de Frecuencia en el laboratorio para instruir prácticas de aprendizaje complementarias? Pregunta número 9 y la pregunta número 10 de que si ¿Le gustaría aprender el manejo de los Multiplicadores de Frecuencia a través de un manual de usuario y guía de laboratorio?, con esto notamos que existe gran interés por los estudiantes puesto que este tipo de dispositivos como son bastante utilizados en sistemas de comunicaciones de microondas conllevarían a elevar el ímpetu de conocimiento en los procesos de enseñanza aprendizaje en la Carrera, estos detalles podemos observar en el gráfico 1-4.

4.2. RESULTADOS ESTADÍSTICOS

4.2.1. *Resultados del análisis de la ganancia de los multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5*

Los resultados del análisis estadístico de los dispositivos multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5, referente a la ganancia, puede afectar el normal desenvolvimiento de los dispositivos puesto que estas condiciones irán varían dependiendo el tipo de multiplicador de frecuencia, ya que no trabajan en los mismos rangos de frecuencia y potencia de entrada.

4.2.1.1. *Ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+*

Los resultados estadísticos sobre el efecto ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ se observa en la tabla 1-4, con sus niveles altos (1,0) y bajos (-1,0), cuando su nivel de frecuencia de entrada es bajo (-1,0) y su nivel de potencia de entrada es bajo (-1,0) la ganancia a la salida será de igual manera baja de 11.5dB, mientras que si su nivel de frecuencia y potencia de entrada son altos (1,0) de igual manera dispondrá de ganancia alta de 18.5dB. Podemos notar que lo más influyente en aumentar la ganancia a la salida son los niveles de frecuencia altos de entrada (1,0).

Tabla 1-4: Niveles altos (1,0) y bajos (-1,0) de frecuencia y potencia de entrada del multiplicador X2 KSX2-24+

BLOQUE	Frecuencia (GHz)	Potencia (dBm)	Ganancia (dB)
1	-1,0	-1,0	11,5
1	1,0	-1,0	15
1	1,0	1,0	18,5
1	-1,0	1,0	13,7

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En el gráfico 2-4, se observa que existe dos variables de entrada y una interacción entre ellas de menor grado, además considerando valores altos y bajos de frecuencia y potencia a la entrada los niveles de potencia es la variable de mayor impacto en el dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+.

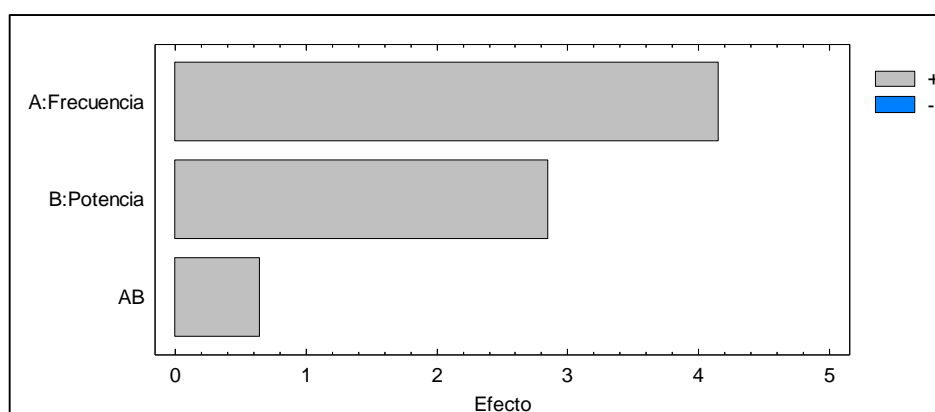


Gráfico 2-4: Diagrama de Pareto de la ganancia del multiplicador X2 KSX2-24+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En el gráfico 3-4, muestra los resultados mas relevantes para la ganancia cuando disponemos de valores bajos de frecuencia y bajos de potencia, de igual manera presenta el alcance de la ganancia

que va a tener el multiplicador de frecuencia X2 cuando el valor de frecuencia y valor de potencia va a ser alto, esto conllevara a ingresar los valores bajos a la entrada para tener un optimo funcionamiento del dispositivo.

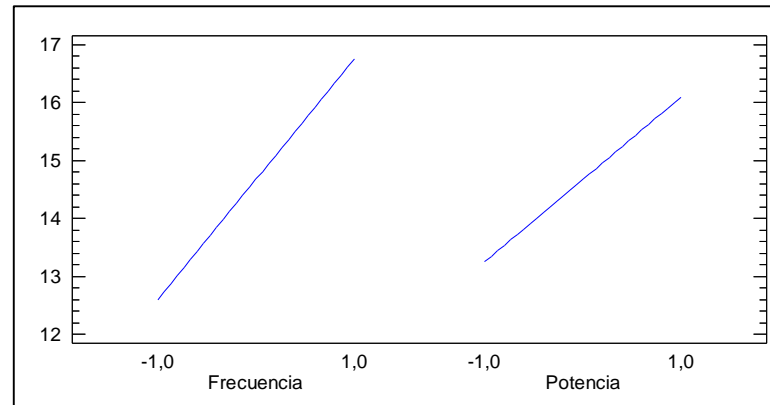


Gráfico 3-4: Efectos principales de la ganancia del multiplicador X2 KSX2-24+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

El análisis de la varianza particiona la variabilidad de la ganancia en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Desafortunadamente no hay grados de libertad disponibles para estimar el error. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 100,0% de la variabilidad de la ganancia. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%.

El Coeficiente de regresión para la ganancia muestra el modelo matemático que se ha ajustado a los datos que le imparte los niveles de frecuencia y potencia tomados anteriormente para el análisis estadístico. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Ganancia = 14,675 + 2,075 * Frecuencia + 1,425 * Potencia + 0,325 * Frecuencia * Potencia$$

Ecuación 1-4

Al incorporar los valores altos y bajos de las variables de frecuencia y potencia de entrada, podemos observar la relevancia que existe manteniendo un valor bajo de frecuencia puesto que esta variable es la mayor causante de elevar la ganancia en lo cual el dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ sería más inestable, mientras que si mantenemos los valores equilibrados y bajos obtendríamos el mejor desenvolvimiento del dispositivo sin tener mayores alteraciones en su funcionamiento, es decir un trabajo óptimo.

4.2.1.2. Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+

Los resultados estadísticos sobre el efecto de ganancia que produce en el multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ se observa en la tabla 2-4, con sus valores altos (1,0) y bajos (-1,0) muestra, cuando su valor de frecuencia de entrada es bajo (-1,0) y su valor de potencia de entrada es bajo (-1,0) la ganancia será de igual manera bajos de 15.5dB, mientras que si su valor de frecuencia y potencia son altos (1,0) de igual manera dispondrá de ganancia alta de 21dB a la salida. Podemos notar que lo más influyente en aumentar la ganancia es la potencia de entrada alta (1,0).

Tabla 2-4: Niveles altos (1,0) y bajos (-1,0) de frecuencia y potencia de entrada del multiplicador X3 RMK-3-123+

BLOQUE	Frecuencia (GHz)	Potencia (dBm)	Ganancia (dB)
1	1,0	1,0	21
1	1,0	-1,0	17,5
1	-1,0	1,0	19
1	-1,0	-1,0	15,5

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En el gráfico 4-4, se observa que existe dos variables de entrada y una interacción entre ellas de menor grado, además considerando valores altos y bajos de frecuencia y potencia a la entrada la ganancia es la variable de mayor impacto en el dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+, a diferencia del análisis del dispositivo anterior gráfico 2-4 notamos que en este dispositivo lo que mayor relevancia causa en elevar la ganancia es la potencia de entrada que recibe el dispositivo.

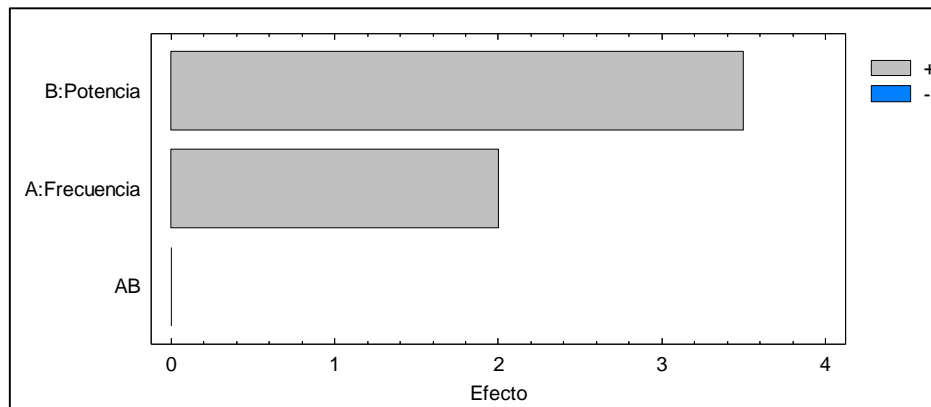


Gráfico 4-4: Diagrama de Pareto de la ganancia del multiplicador X3 RMK-3-123+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En el gráfico 5-4, muestra los resultados mas relevantes para la ganancia cuando disponemos de valores bajos de frecuencia y bajos de potencia, de igual manera presenta el alcance de la ganancia que va a tener el multiplicador de frecuencia X3 cuando el valor de frecuencia y valor de potencia va a ser alto, esto conllevara a ingresar los valores bajos a la entrada tanto de frecuencia y potencia como solo de potencia para tener un optimo funcionamiento del dispositivo.

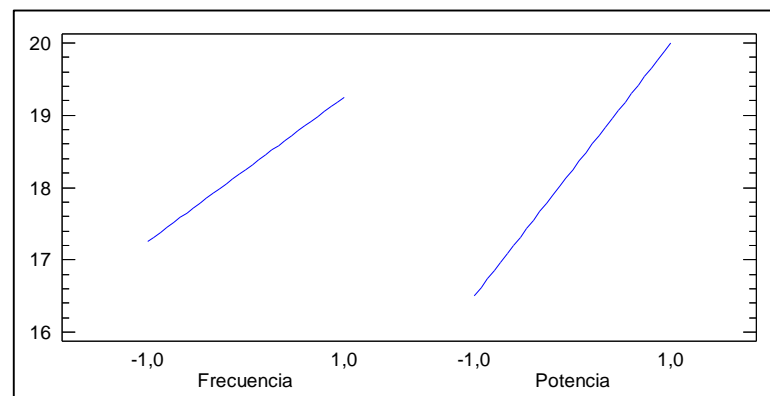


Gráfico 5-4: Efectos principales de la ganancia del multiplicador X3 RMK-3-123+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

El análisis de la varianza particiona la variabilidad de la ganancia en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Desafortunadamente no hay grados de libertad disponibles para estimar el error. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 100,0% de la variabilidad de la ganancia. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%.

El Coeficiente de regresión para la ganancia muestra el modelo matemático que se ha ajustado a los datos que le imparte los niveles de frecuencia y potencia tomados anteriormente para el análisis estadístico. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Ganancia = 18,25 + 21,0 * Frecuencia + 1,75 * Potencia + 0,0 * Frecuencia * Potencia$$

Ecuación 2-4

Al incorporar los valores altos y bajos de las variables de frecuencia y potencia de entrada, podemos observar la relevancia que existe manteniendo un valor bajo de potencia puesto que esta variable es la mayor causante de elevar el nivel de ganancia en lo cual el dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ sería más inestable, mientras que si mantenemos los valores equilibrados y bajos obtendríamos el mejor desenvolvimiento del dispositivo sin tener mayores alteraciones en su funcionamiento, es decir un trabajo óptimo.

4.2.1.3. Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+

Los resultados estadísticos sobre el efecto de la ganancia que produce en el multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ se observa en la tabla 3-4, con sus valores altos (1,0) y bajos (-1,0) muestra, cuando su valor de frecuencia de entrada es bajo (-1,0) y su valor de potencia de entrada es bajo (-1,0) la ganancia será de igual manera bajos de 28 dB a su salida, mientras que si su valor de frecuencia y potencia son altos (1,0) de igual manera dispondrá de ganancia alta de 34.5dB a su salida. Podemos notar que lo más influyente en aumentar la ganancia es la potencia de entrada alta (1,0).

Tabla 3-4: Niveles altos (1,0) y bajos (-1,0) de frecuencia y potencia del multiplicador X5 RMK-5-83+

BLOQUE	Frecuencia (GHz)	Potencia (dBm)	Niveles de Potencia (dB)
1	1,0	-1,0	30
1	-1,0	-1,0	28
1	-1,0	1,0	32,5
1	1,0	1,0	34,5

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En el gráfico 6-4, se observa que existe dos variables de entrada y una interacción entre ellas de menor grado, además considerando valores altos y bajos de frecuencia y potencia a la entrada la ganancia es la variable de mayor impacto en el dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+, a diferencia del análisis del dispositivo anterior gráfico 2-4 notamos que en este dispositivo lo que mayor relevancia causa en elevar la ganancia es la potencia de entrada que recibe el dispositivo.

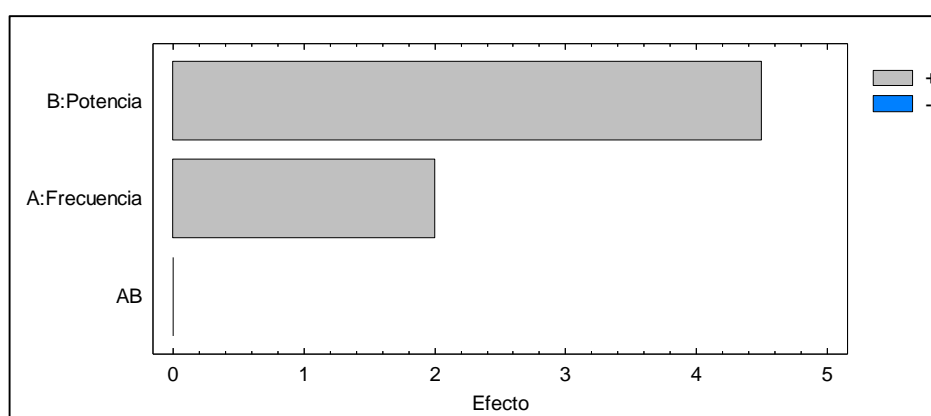


Gráfico 6-4: Diagrama de Pareto de la ganancia del multiplicador X5 RMK-5-83+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En el gráfico 7-4, muestra los resultados mas relevantes para la ganancia cuando disponemos de valores bajos de frecuencia y bajos de potencia, de igual manera presenta el alcance de la ganancia que va a tener el multiplicador de frecuencia X5 cuando el valor de frecuencia y valor de potencia va a ser alto, esto conllevara a ingresar los valores bajos a la entrada tanto de frecuencia y potencia como solo de potencia para tener un optimo funcionamiento del dispositivo.

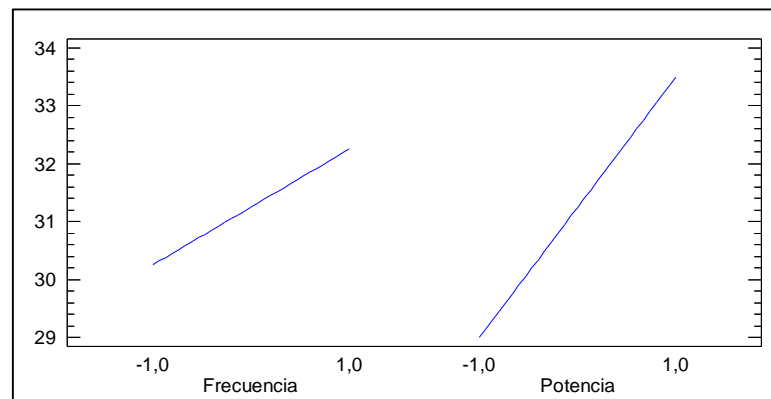


Gráfico 7-4: Efectos principales para la ganancia del multiplicador X5 RMK-5-83+

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

El análisis de la varianza particiona la variabilidad de la ganancia en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Desafortunadamente no hay grados de libertad disponibles para estimar el error. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 100,0% de la variabilidad de ganancia. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%.

El Coeficiente de regresión para la ganancia muestra el modelo matemático que se ha ajustado a los datos que le imparte los niveles de frecuencia y potencia tomados anteriormente para el análisis estadístico. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Ganancia = 31,25 + 1,0 * Frecuencia + 2,25 * Potencia + 0,0 * Frecuencia * Potencia$$

Ecuación 3-4

Al incorporar los valores altos y bajos de las variables de frecuencia y potencia de entrada, podemos observar la relevancia que existe manteniendo un valor bajo de potencia puesto que esta variable es la mayor causante de elevar la ganancia en lo cual el dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ sería más inestable, mientras que si mantenemos los valores equilibrados y bajos obtendríamos el mejor desenvolvimiento del dispositivo sin tener mayores alteraciones en su funcionamiento, es decir un trabajo óptimo.

4.3. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS MULTIPLICADORES DE FRECUENCIA X2, X3 Y X5

En el presente espacio se detalla la manera de conectar los dispositivos multiplicadores de frecuencia con tecnología MMIC X2, X3 y X5 implementados, con los equipos de TX y RX (figura 1-4), así como también los resultados obtenidos de las mediciones en el laboratorio de comunicaciones y microondas en la FIE-ESPOCH, luego de esto procesamos los resultados obtenidos con el software Matlab. Los materiales que no son parte del diseño, pero que también son primordiales en las mediciones son las sondas SMA macho de 50Ω (figura 2-4) y el adaptador SMA hembra de 50Ω para el equipo de RX (figura 3-4). Antes de empezar a realizar las mediciones se debe seleccionar las configuraciones iniciales en los equipos TX y RX y comprobar el correcto funcionamiento.

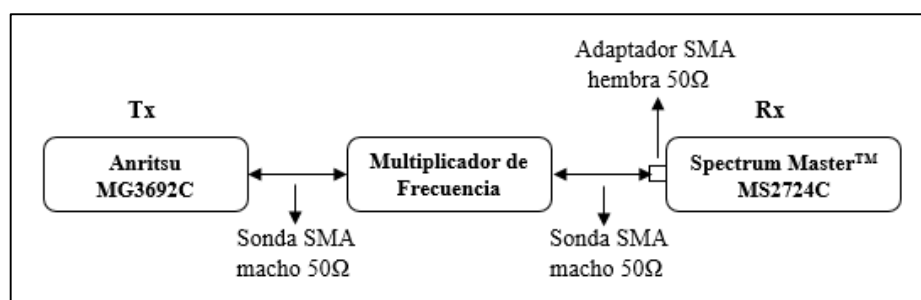


Figura 1-4: Esquema de conexión de los multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

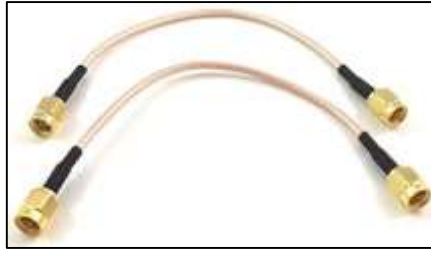


Figura 2-4: Sondas SMA macho 50Ω

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019



Figura 3-4: Adaptador hembra para RX 50Ω

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

4.3.1. Resultados de los multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5 con tecnología MMIC

En el presente espacio se muestra el análisis de resultados de la medición de los multiplicadores de frecuencia X2, X3 y X5 implementados con tecnología MMIC, comparando los datos obtenidos en la medición con los dotados los Datasheet de los modelos X2 KSX2-24+, X3 RMK-3-123+ y X5 RMK-5-83+, el equipo Transmisor ha sido configurado de la siguiente manera; para el modelo X2 KSX2-24+ se configuró una potencia de 13 dBm y un barrido de frecuencia de 5 a 10 GHz, el modelo X3 RMK-3-123+ se configuró una potencia de 15 dBm y un barrido de frecuencia de 2.2 a 4 GHz y el modelos X5 RMK-5-83+ se configuró una potencia de 10 dBm y un barrido de frecuencia de 1 a 1.6 GHz, con saltos de 0.01 GHz para todos los modelos. El equipo Receptor ha sido configurado para percibir señales de 5 a 20 GHz para el modelo X2 KSX2-24+ sin atenuación, para el modelo X3 RMK-3-123+ de 2.2 a 12GHz con atenuación de 10 dB y para el modelo X5 RMK-5-83+ de 1 a 8 GHz sin atenuación y un nivel de referencia de 0 dBm para todos los modelos, los datos serán procesados en el software Matlab.

4.3.1.1. Resultados multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ (Entrada 5-10GHz / Salida 10-20GHz)

Primero configuramos el Tx con una potencia de 13 dBm y un barrido de frecuencia de 5 a 10 GHz y el Rx ha sido configurado para percibir señales de 5 a 20 GHz, luego de esto vamos a conectar el puerto de salida del Tx al puerto INPUT del dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ mediante la utilización de la sonda de 50Ω , luego mediante la utilización de una segunda sonda de 50Ω conectamos el puerto OUTPUT del dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ a la entrada del Rx .

En la operación del dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ se realizó un barrido de frecuencia que va desde 5 a 20 GHz, con una respuesta de salida que va desde 10 a 20 GHz como se puede observar en el gráfico 8-4, en este se observa la ganancia que están en un margen desde los -12 a -17.5 dB, tiende a tener una estabilidad en -14 dB, es un margen idóneo de operación puesto que no genera una ganancia tan baja que puedan llegar afectar al correcto funcionamiento del modelo X2 KSX2-24+.

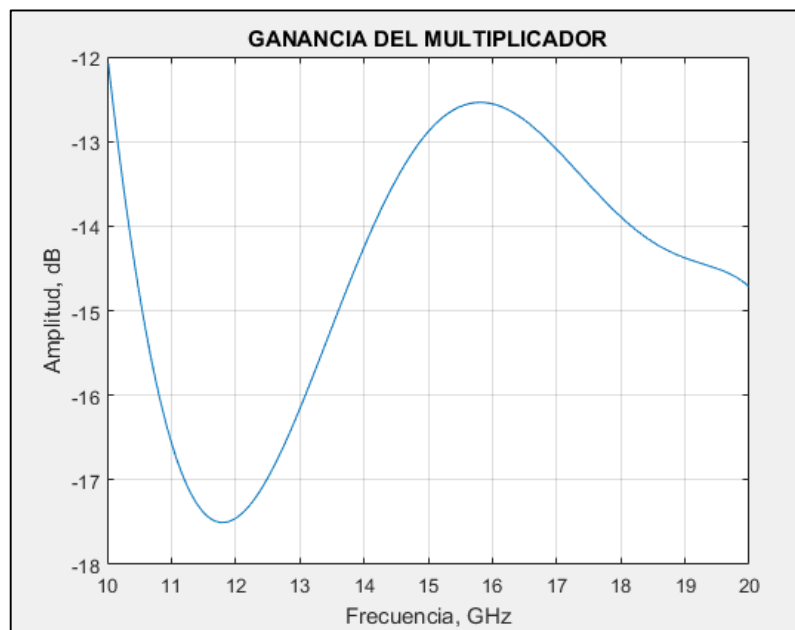


Gráfico 8-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ de 10 a 20GHz.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

El dispositivo multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ no solo nos permite tener una respuesta en frecuencia de X2, sino también nos brinda otras respuestas adicionales en este caso F3 como se puede observar en el gráfico 9-4, que muestra la ganancia del modelo X2 KSX2-24+ del armónico F3 con un barrido de frecuencia de 5 a 20 GHz y una salida en particular F3 de 15 a 20 GHz. La ganancia del modelo X2 KSX2-24+ en el armónico F3 para este caso está entre -26 a -38.8 dB que, aunque es un margen menor de ganancia en comparación a la obtenida anteriormente (ver gráfico 8-4) tiende a tener una estabilidad en los -30 dB, que sigue siendo aceptable y puede ser también utilizado para este caso en particular.

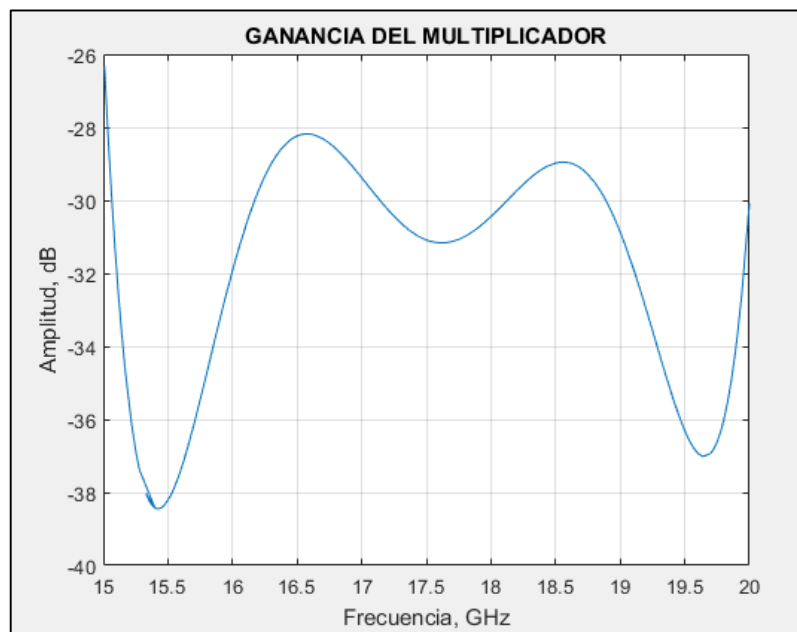


Gráfico 9-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ de 15 a 20GHz, armónico F3.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

4.3.1.2. Resultado multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ (Entrada 2.2-4GHz / Salida 6.6-12GHz)

Primero configuramos el Tx con una potencia de 15 dBm, atenuación de 10 dB y un barrido de frecuencia de 2.2 a 4 GHz y el Rx ha sido configurado para percibir señales de 2.2 a 12 GHz, luego de esto vamos a conectar el puerto de salida del Tx al puerto INPUT del dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ mediante la utilización de la sonda de 50Ω, luego mediante la utilización de una segunda sonda de 50Ω conectamos el puerto OUTPUT del dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ a la entrada del Rx .

En el análisis del dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ se realizó un barrido de frecuencia que va desde 2.2 a 12 GHz con una salida en particular de 6.6 a 12GHz, en el gráfico 10-4, se observa la ganancia que va desde -1 a -26 dB, tiende a tener una estabilidad en los -10 dB, en este modelo en particular se conoce que según aumenta el grado de multiplicación del dispositivo aumentara la ganancia puesto que la frecuencia de operación será menor, por otra parte también aumentarían los valores atípicos en la medición, y esto se podría dar por variación que tiene el Tx al momento de realizar las mediciones.

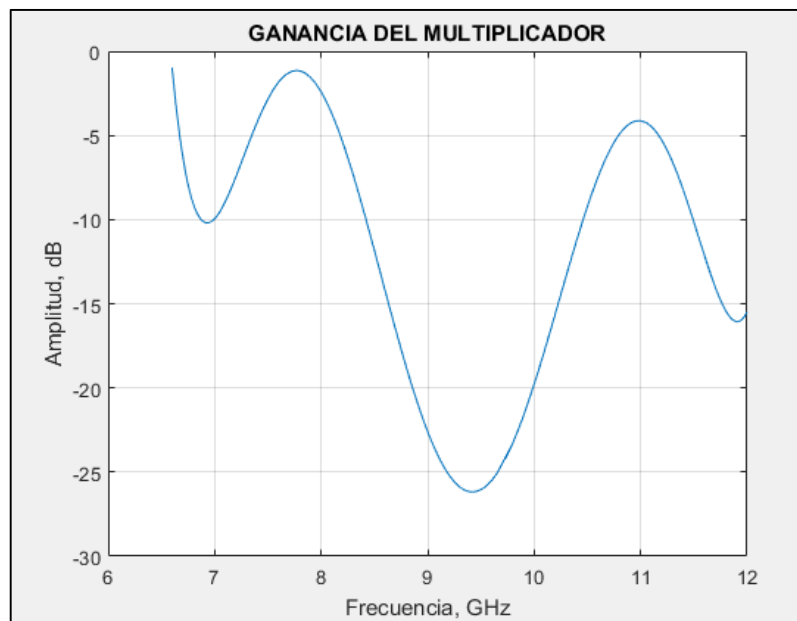


Gráfico 10-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ de 6.6 a 12GHz.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

Este modelo de dispositivo multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ también como el modelo anterior posee la particularidad de brindar otro tipo de salida a más de la principal que en este caso sería de X2, la misma que podemos observar en el gráfico 11-4, el cual muestra el resultado de la medición del dispositivo con una salida que va desde 4.4 a 8 GHz y que tiene una ganancia que están -30 a -51dB, con una estabilidad a lo largo de los -45 dB, en este caso los niveles de potencia son menores puesto que el modelo X3 RMK-3-123+ al ser un multiplicador de grado impar tiene menor ganancia en sus grados de multiplicación pares como podemos observar en el gráfico 11-4, aunque disponga de esta ganancia baja, esta especificación de multiplicación también puede ser utilizada con este modelo de dispositivo para futuras prácticas de laboratorio.

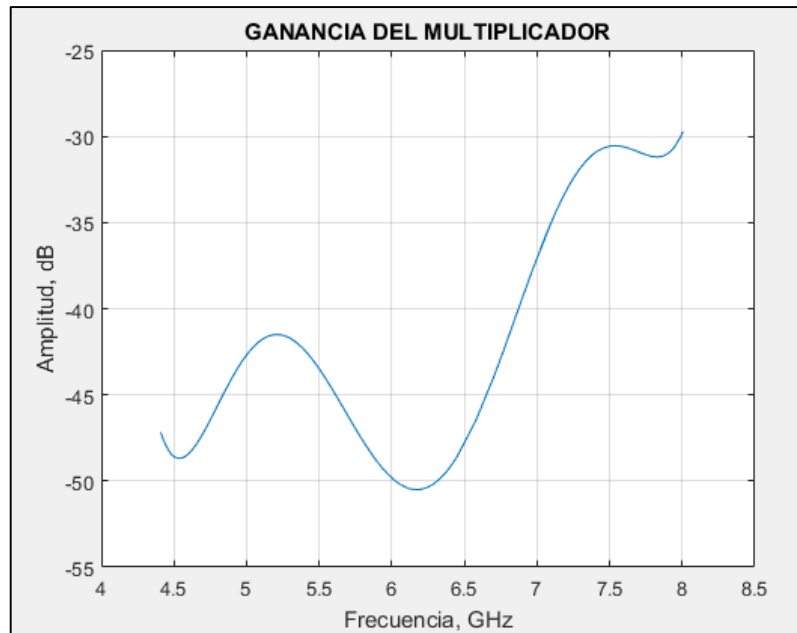


Gráfico 11-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ de 4.4 a 8GHz, armónico F2.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En el gráfico 12-4, muestra el resultado de la medición del armónico F4 del dispositivo X3 RMK-3-123+, el cual nos brinda una respuesta en frecuencia de 8.8 a 16 GHz y con una ganancia que va desde -38 a -54.8 dB con una estabilidad a lo largo de los -42 dB, como la medición vista anterior gráfico 11-4, podemos notar que el grado par de multiplicación X4 del dispositivo también posee baja potencia en comparación al principal X3, puesto que por las mismas razones detalladas anteriormente este dispositivo como es un multiplicador impar posee mejores respuestas de ganancia en sus grados impares mas no en sus grados pares, con el análisis realizado se puede decir que este dispositivo también podrá trabajar en el armónico F4.

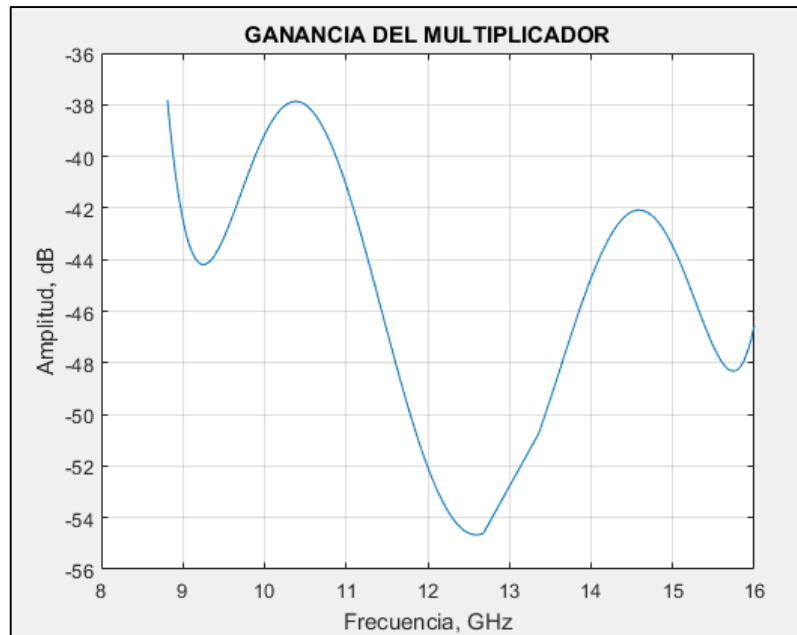


Gráfico 12-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ de 8.8 a 16GHz, armónico F4.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

4.3.1.3. Resultado multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ (Entrada 1-1.6 GHz / Salida 5-8 GHz)

Primero configuramos el Tx con una potencia de 10 dBm, y un barrido de frecuencia de 1 a 1.6 GHz y el Rx ha sido configurado para percibir señales de 1 a 8 GHz, luego de esto vamos a conectar el puerto de salida del Tx al puerto INPUT del dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ mediante la utilización de la sonda de 50Ω, luego mediante la utilización de una segunda sonda de 50Ω conectamos el puerto OUTPUT del dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ a la entrada del Rx.

En el gráfico 13-4, muestra el resultado de la medición realizada del dispositivo multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+, misma que presenta un barrido de frecuencia de 1 a 1.6 GHz con una salida en particular de 5 a 8 GHz, posee una ganancia de -18 a -28.5 dB con una estabilidad en -20dB, este modelo en particular posee una mayor estabilidad en comparación a los modelos anteriores, pero posee la desventaja de mientras mayor es el grado de multiplicación del dispositivo es menor el valor de entrada de frecuencia del mismo, puesto que a mayores frecuencias tiende a poseer mayores dificultades de operación un dispositivo de este tipo.

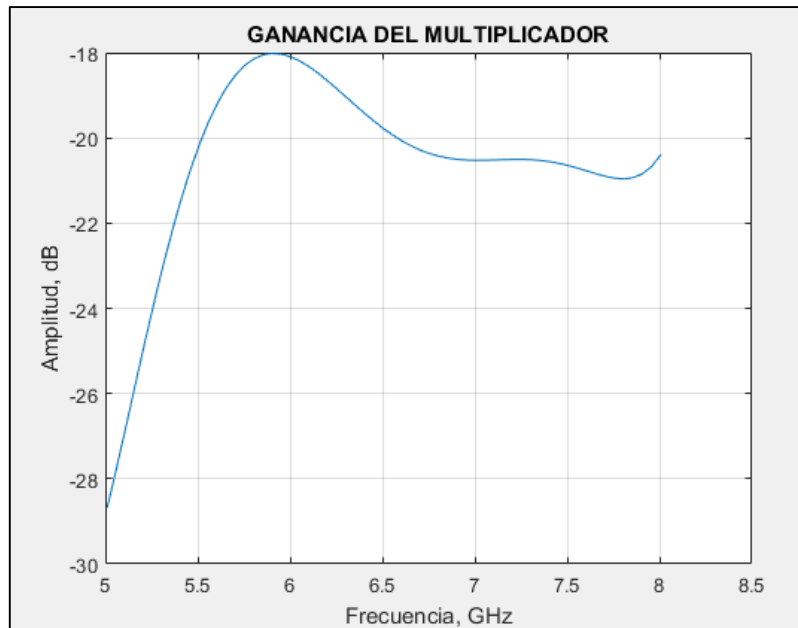


Gráfico 13-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 5 a 8GHz.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En gráfico 14-4, muestra los resultados del modelo X5 RMK-5-83+ del armónico F2, como en los anteriores modelos en este también se puede visualizar los otros valores de multiplicación que este nos brinda a la salida, en este caso un multiplicador X2, aunque posee una mayor variación de la ganancia en este caso -55.5 a -63.5 dB y una estabilidad de los -60dB también puede ser utilizado en este armónico F2 en particular.

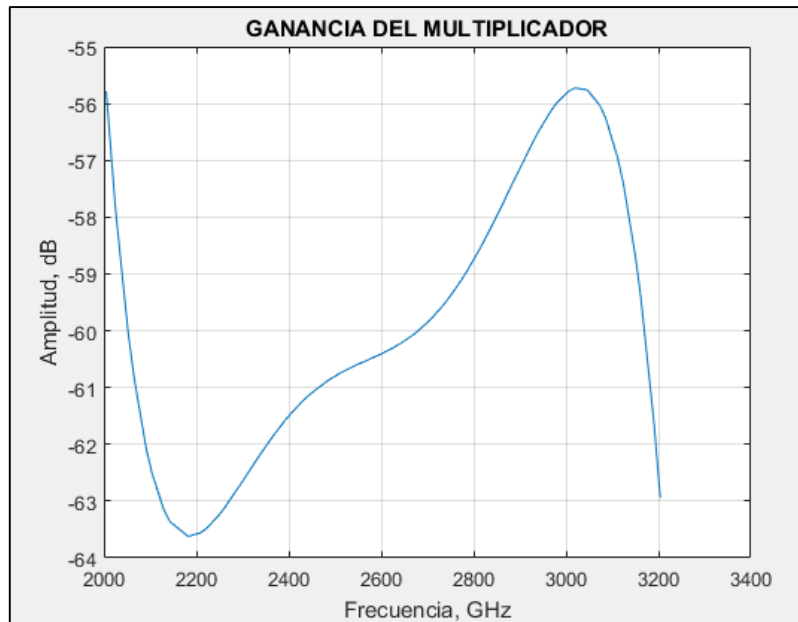


Gráfico 14-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 2 a 3.2GHz, armónico F2.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En gráfico 15-4, muestra los resultados del modelo X5 RMK-5-83+ del armónico F3, como en los anteriores modelos en este también se puede utilizar los otros valores de multiplicación que este modelo nos brinda a la salida, posee una variación en la ganancia de -18.3 a -27 dB y una estabilidad en los -22dB, nótese también que la ganancia en este caso impar mejora considerablemente con respecto al armónico visto anterior gráfico 14-4 puesto que este dispositivo tiene un armónico principal impar X5 tiende en este sentido mejores respuestas de ganancia en comparación a las salidas en armónicos par.

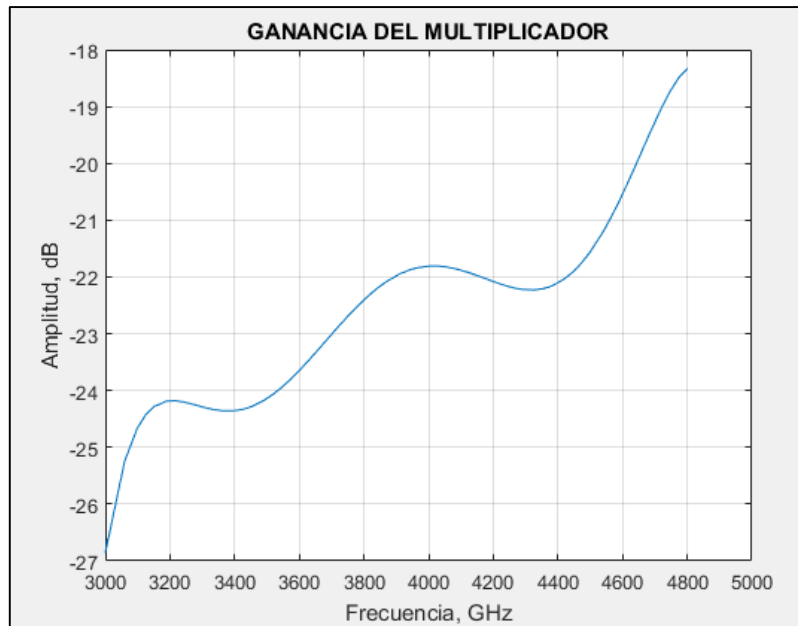


Gráfico 15-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 3 a 4.8GHz, armónico F3.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

En gráfico 16-4, muestra los resultados del modelo X5 RMK-5-83+ del armónico F4, como en los anteriores modelos en este también se puede utilizar los otros valores de multiplicación que este nos brinda a la salida, en este caso un multiplicador X4, aunque posee una mayor variación de la ganancia en este caso -57.3 a -63.5 dB y una estabilidad en los -59dB también puede ser utilizado en esta configuración en particular. Y se continúa demostrando que en armónicos par tiene menor ganancia que en armónicos impar.

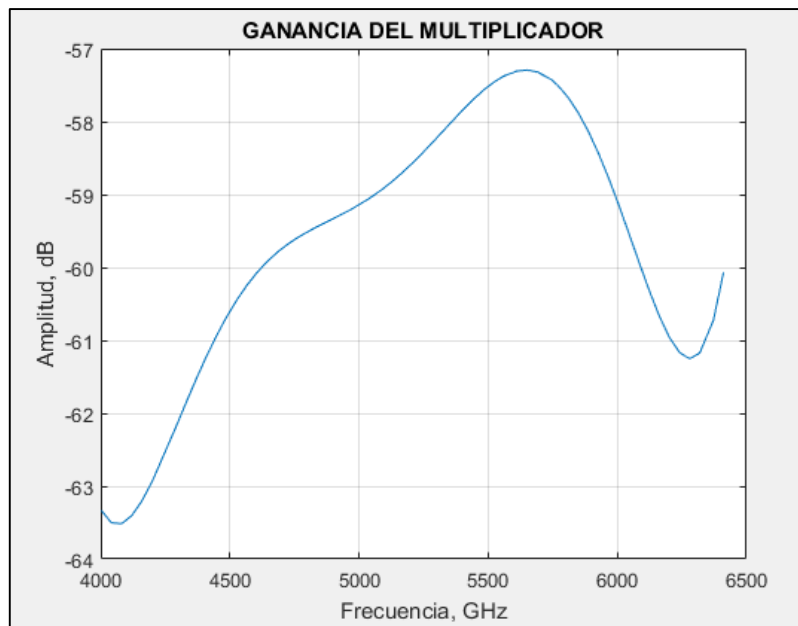


Gráfico 16-4: Ganancia del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ de 4 a 6.4GHz, armónico F4.

Realizado por: HERNÁNDEZ José, 2019

CONCLUSIONES

Una vez realizada la investigación, se diseñó e implementó el set de multiplicadores de frecuencia para las bandas c, x, y ku de alta frecuencia utilizando tecnología MMIC, el mismo que está disponible en el laboratorio de comunicaciones y microondas en la FIE-ESPOCH.

La importancia de la encuesta realizada a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes de la ESPOCH, para determinar el impacto que tendrá dotar de este tipo de dispositivos, nos indica que el 93,46% de los estudiantes encuestados les gustaría disponer de multiplicadores de frecuencia en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Además, el 98,13% de los estudiantes expresaron su deseo de disponer de una guía de practica y manual de usuario que les permita manipular de manera correcta los dispositivos.

Con el análisis estadístico de la ganancia de los multiplicadores de frecuencia en sus tres modelos: X2 KSX2-24+, X3 RMK-3-123+ Y X5 RMK-5-83+, se determina que para X2 el nivel más influyente en elevar la ganancia el nivel de frecuencia de entrada, mientras que en X3 y X5 lo más influyente en elevar la ganancia es el nivel de potencia de entrada.

Las pruebas realizadas a los dispositivos multiplicadores de frecuencia con tecnología MMIC se verifico el correcto funcionamiento. Las mediciones obtenidas de los modelos: X2 muestra una ganancia de -14dB en su armónico encontrándose dentro de los parámetros que se presenta en el Datasheet, dando con esto una eficiencia del 97,7%. X3 muestra una ganancia de -15dB en su armónico encontrándose dentro de los parámetros que se presenta en el Datasheet, dando con esto una eficiencia del 94,44% y X5 muestra una ganancia de -20dB en su armónico encontrándose dentro de los parámetros que se presenta en el Datasheet, dando con esto una eficiencia del 93,75%.

Las mediciones realizas en los tres multiplicadores de frecuencia no solo ofrecen la respuesta en la salida para la que fueron creados, sino que muestran otros armónicos que también pueden ser utilizados de la misma manera que los fundamentales.

Con el manual de usuario y guía de práctica, se indica la utilización y comprobación de los dispositivos multiplicadores de frecuencia de una manera concisa y fácil que le servirá al estudiante en la ejecución de prácticas en el laboratorio de comunicaciones y microondas.

RECOMENDACIONES

Para el diseño de pistas en los multiplicadores de frecuencia, se debe calcular el acoplamiento a 50Ω de la E/S, puesto que esta dimensión varía dependiendo de la selección de material dieléctrico que se vaya a utilizar para su implementación.

Se debe elegir el material idóneo para altas frecuencias al momento de trabajar con tecnología MMIC debido a que las pistas se despeguen por su baja adherencia al momento de soldar o presente posteriormente atenuación en las salidas de los resultados.

Los métodos de soldadura de los dispositivos deben ser de manera concisa y rápida para que el chip no se caliente y esto conlleve a que se pierda o se generen grumos de soldadura que generen pérdidas o falta de comunicación en los pines del dispositivo.

Se recomienda que cuando los estudiantes vayan a realizar las practicas respectivas no deben tocar el chip con los dedos por que la estática del cuerpo dañaría al dispositivo.

GLOSARIO

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones.

URSS: Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

RF: Radio Frecuencia.

MF: Frecuencia Media.

VHF: Frecuencias Muy Altas.

FM: Frecuencia Modulada.

EHF: Extremadamente Alta Frecuencia.

SHF: Super Alta Frecuencia.

UHF: Ultra Alta Frecuencia.

BPF: Filtro Pasa Banda.

DBS: El satélite de transmisión directa (Direct Broadcast Satellite).

FSS: Servicios satelitales fijos.

BSS: Servicios de Difusión por Satélite.

MULTIPLIER: Multiplicador de frecuencia.

IEEE: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

MICROSTRIP: Líneas de transmisión eléctrica enrutadas en las capas externas.

MMIC: Circuito Integrado Monolítico de Microondas.

MIC: Circuitos Integrados de Microondas.

HMIC: Circuito integrado de microondas heterolítico.

PCB: Placa de Circuito Impreso.

PTFE: Politetrafluoroetileno.

SMA: Tecnología de sistemas, medición e instalaciones.

L: Longitud de Onda.

C: Velocidad de la luz.

F: Frecuencia.

FET: Transistor de efecto campo.

STUB: Porción de línea de transmisión.

ARMÓNICOS: Frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental.

AB: Ancho de Banda

BIBLIOGRAFÍA

Bibing. Simulacion de circuitos no lineales de microondas mediante balance armónico. [En línea] 14 de octubre de 2017. [Citado el: 18 de abril de 2018.] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11196/fichero/Volumen+I%252FCapitulo2..>

CAMARGO, E.. *Design of FET frequency multipliers and harmonic oscillators.* 1998.

DUARTE MUÑOZ, E. Frecuencias de comunicacion satelital. [En línea] 2014. <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=209> .

CASTILLO, F.J. IIESA Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. [En línea] 18 de Diciembre de 2014. <http://www.ieesa.com/universidades/tesis01/capt3b.pdf>.

C-Band. Tech-FAQ. [En línea] 2016. <http://www.tech-faq.com/c-band.shtml..>

Conexcon. Familia SMA. [En línea] abril de 2016. [Citado el: 1 de junio de 2018.] <https://www.cenval.es/conectores/conexcon%20PDF%20bis/02800.pdf>.

Copro. Microstrip. [En línea] julio de 2017. [Citado el: 10 de abril de 2018.] <http://copro.com.ar/Microstrip.html>.

EDUforics. [En línea] 26 de Enero de 2018. [Citado el: 02 de Septiembre de 2019.] <http://www.eduforics.com/es/los-10-mejores-recursos-trabaja-alumnado-conflictivo/>.

EEWeb. Microstrip. [En línea] 12 de diciembre de 2017. [Citado el: 5 de abril de 2018.] <https://www.eeweb.com/tools/microstrip-impedance>.

Global Sources. Microstrip Diseño De Circuitos Electrónicos Pcb. [En línea] 1 de junio de 2018. [Citado el: 13 de mayo de 2018.] <http://es.oem-pcb.com/info/microstrip-custom-design-circuit-board-electro-7189772.html>.

IYAMA, Y., IIDA, T. TAKAGI, Y S. URASAKI. . *Second-Harmonic Reflector Type High Gain FET Frecuency Doubler Operating in K-Band*. 1989. págs. 1291-1294.

LINARES MORA, JAIR ALONZO. Semiconductores Organicos. [En línea] [Citado el: 2 de abril de 2018.] <http://s-organicos-ees.blogspot.com/2010/05/mmic-monolithic-microwave-integrated.html>..

MANTOVANI, F. *Active MESFET Multipliers Solve Low Signal Levels*. 1984. págs. 129-131. Vol. 8.

MERLETTI, GUSTAVO ARIEL. *Circuitos para aplicaciones en Radio Frecuencia y Microondas*. s.l. : Universidad Nacional de San Martín, 2016.

MICROWAVE JOURNAL. Microstrip Versus Stripline: How To Make The Choice. [En línea] 10 de Diciembre de 2010. [Citado el: 30 de abril de 2018.] <http://www.microwavejournal.com/blogs/1-rog-blog/post/16668-microstrip-versus-stripline-how-to-make-the-choice>.

Mini-Circuits. [En línea] 2019. [Citado el: 19 de marzo de 2019.] <https://www.minicircuits.com/WebStore/Multipliers.html>.

PAN, J. J. *Wideband Mesfet Microwave Frecuency Multiplier*. 1978. págs. 306-308.

PASCUAL, JUAN PABLO. *El Diseño de Circuitos Integrados Monolíticos de Microondas (MMIC) en los Estudios del Ingeniero de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria*. s.l. : IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 2006. págs. 233-234. Vol. 4.

POLAR. Líneas de transmisión de un solo fin. [En línea] octubre de 2017. [Citado el: 16 de mayo de 2018.] <http://www.polarinstruments.com/products/si/help/surfacemicrostrip.htm>.

RÁBANOS, JOSÉ MARÍA HERNANDO. TRANSMISIÓN POR RADIO . *TRANSMISIÓN POR RADIO* . España : Centro de Estudio Ramon Areces, 2012, pág. 26.

Radar: Types Principles, Bands, Hardware. Everythingweather. [En línea] 2000. <http://www.everythingweather.com/weather-radar/bands.shtml..>

RAUSCHER, C. *High-Frequency Doubler Operation of GaAs Field-Effect Transistors*. 1983. págs. 462-473. Vol. 21.

ROGERS CORPORATION. General Information of Dielectric Constant for RT/duroid® 6010.2LM and RO3010™ High Frequency Circuit Materials. [En línea] octubre de 2017. [Citado el: 14 de enero de 2018.] <http://www.rogerscorp.de/documents/2379/acs/General-Information-of-Dielectric-Constant-for-RT-duroid-6010-2LM-RO3010-High-Frequency-Circuit-Materials.pdf>.

RO4003C™ High Frequency Material Insertion Loss Comparison With Other Material Types. [En línea] octubre de 2017. [Citado el: 14 de enero de 2018.] <https://www.rf-microwave.com/app/resources/uploads/laminates/RO4003-application-note.pdf>.

ROSU, IULIAN. Frequency Multipliers. [En línea] 2011. <http://www.qsl.net/va3iul..>

SIWAKAR, HIMANSHU. Microstrip transmission lines. [En línea] mayo de 2016. [Citado el: 10 de abril de 2018.] https://www.slideshare.net/hdiwakar/microstrip-tl-1st-3?qid=b960f724-4c65-47d3-95b1-71baf6701944&v=&b=&from_search=1.

VESTENICKY. *Frequency Dependence Examination of PCB Material FR4 Relative Permittivity*. 2013. Vol. 12.

ANEXOS

Anexo A : Encuesta

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA

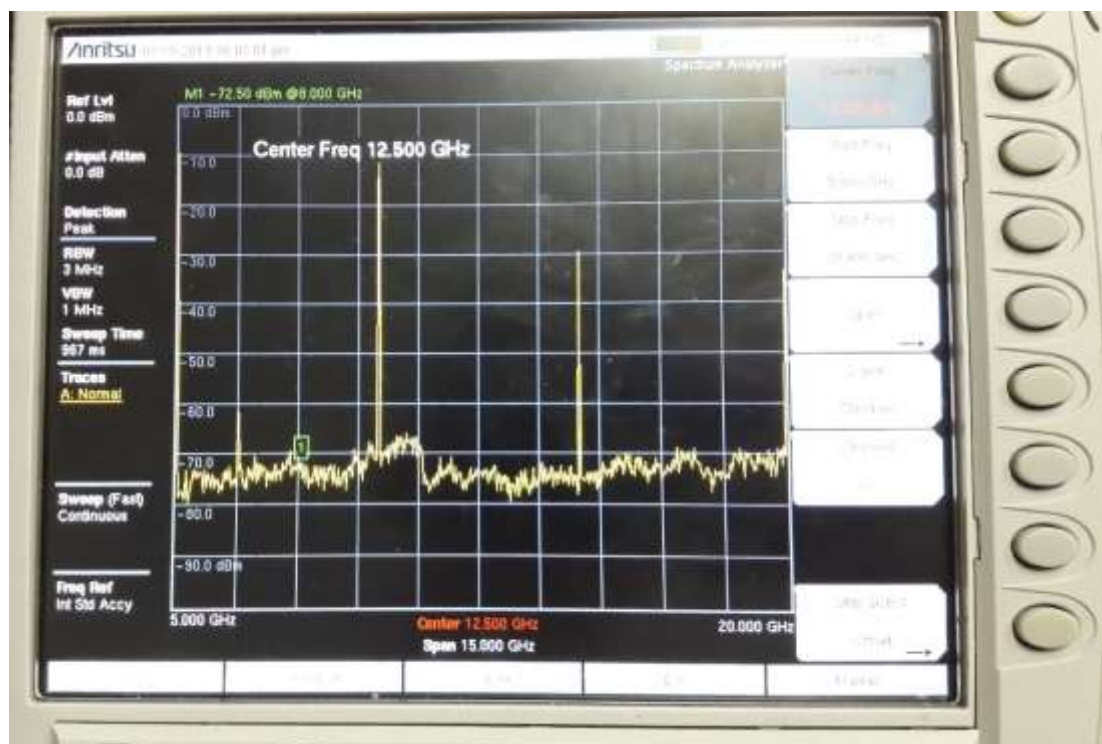
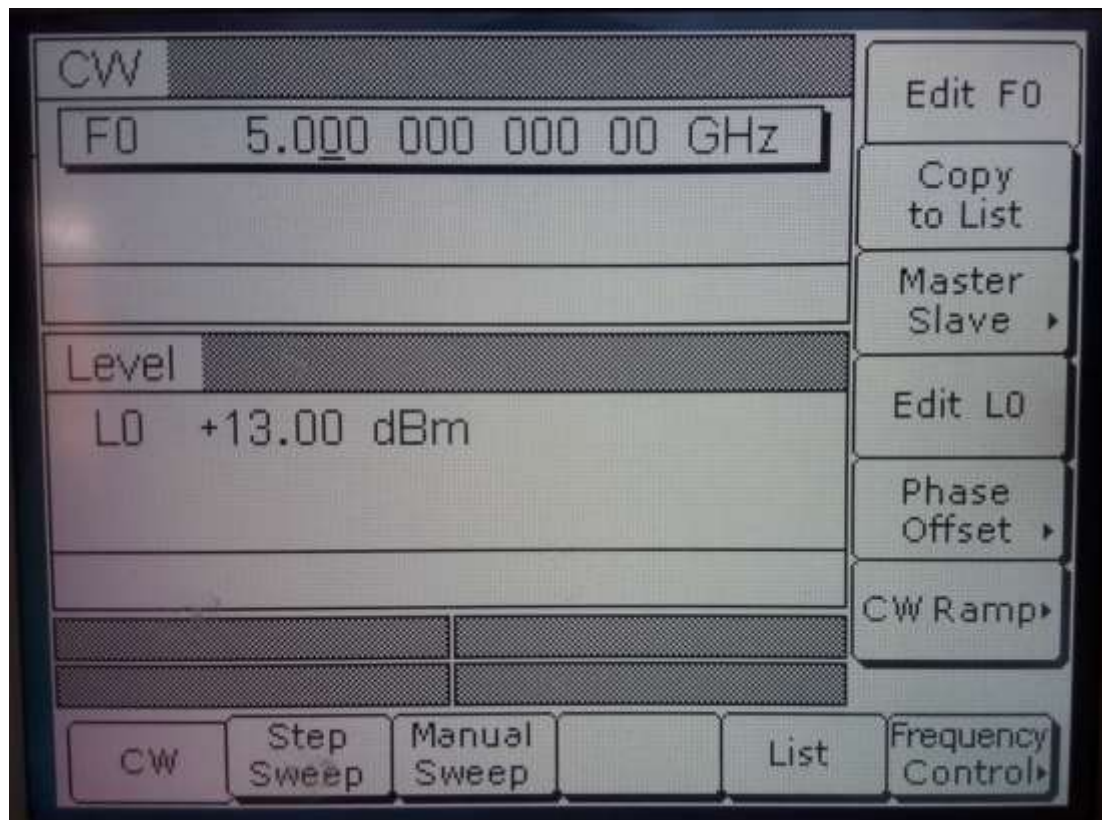
Estimado Encuestado.

Soy estudiante de la Carrera De Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes, estoy realizando una encuesta relacionada al impacto que tendrá al dotar de Dispositivos Multiplicadores de Frecuencia en el Laboratorio De Comunicaciones Y Microondas de la FIE-ESPOCH.

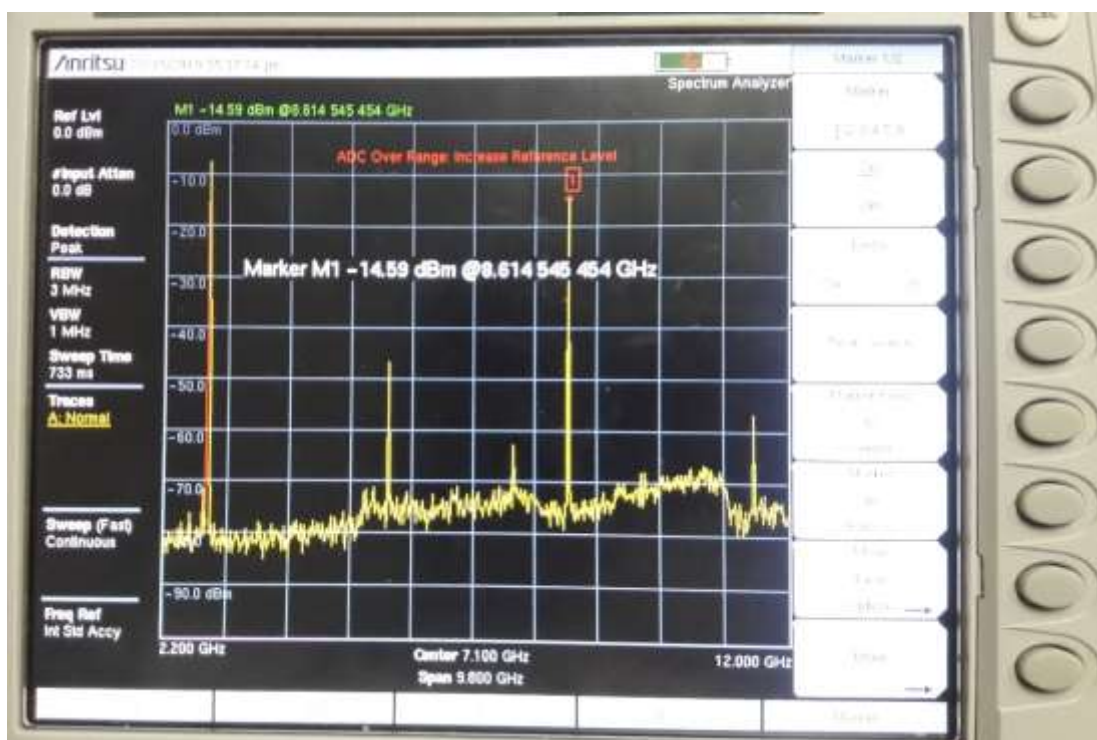
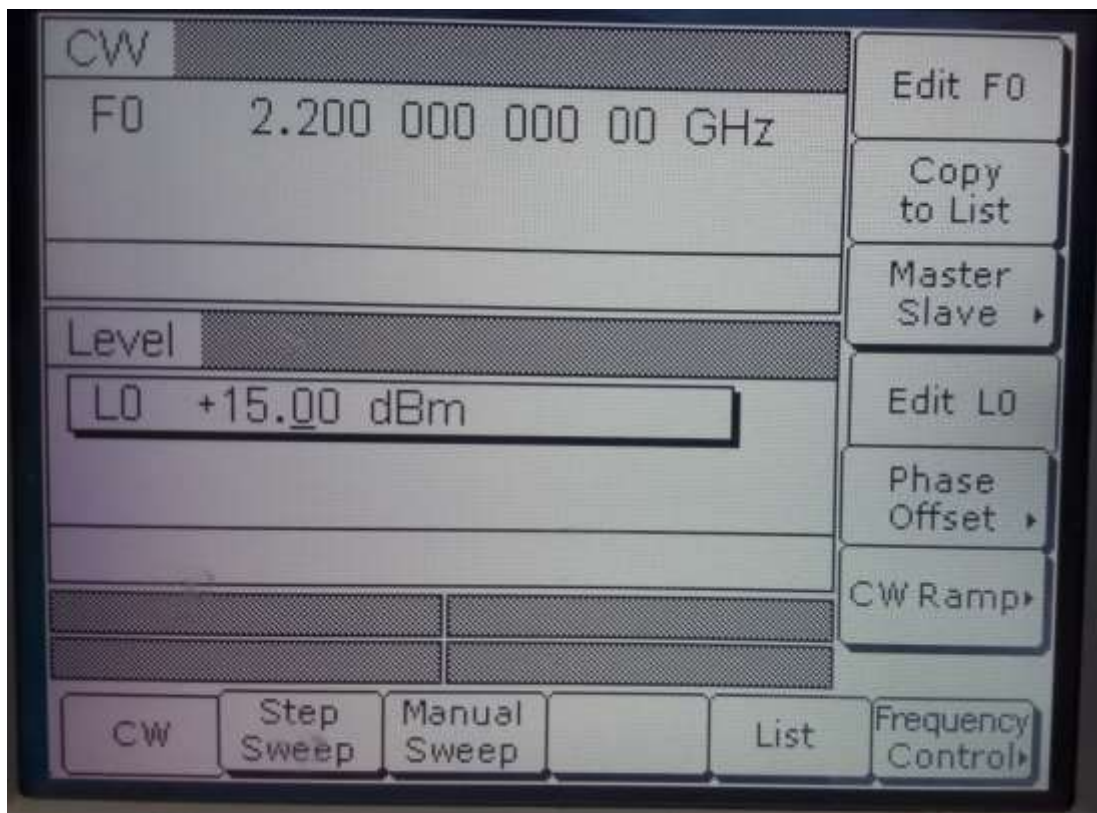
1. ¿Tiene conocimiento que es un Laboratorio de Comunicaciones y Microondas?
SI ☐ NO ☐
2. ¿Conoce usted si la Facultad tiene laboratorios didácticos para procesos de enseñanza aprendizaje de Microondas?
SI ☐ NO ☐
3. ¿Ha recibido clases en este tipo de laboratorio en procesos de enseñanza aprendizaje?
SI ☐ NO ☐
4. ¿Le gustaría que la Facultad disponga de un laboratorio para estos fines?
SI ☐ NO ☐
5. ¿Le ayudaría en el aprendizaje, un laboratorio de Microondas que complementen con la práctica los conocimientos adquiridos?
SI ☐ NO ☐
6. ¿Conoce la existencia de los equipos Generador de Señales y Analizador de Espectro que dispone la facultad al momento?
SI ☐ NO ☐
7. ¿Ha utilizado estos equipos disponibles en la facultad para el análisis de señales?
SI ☐ NO ☐
8. ¿Conoce como manipular de manera correcta estos equipos disponibles en la facultad?
SI ☐ NO ☐
9. ¿Le gustaría que estén disponibles los Dispositivos Multiplicadores de Frecuencia en el laboratorio para instruir prácticas de aprendizaje complementarias?
SI ☐ NO ☐
10. ¿Le gustaría aprender el manejo de los dispositivos multiplicadores de frecuencia a través de un manual de usuario y guía de laboratorio?
SI ☐ NO ☐

Anexo B: Mediciones en los equipos de TX y RX

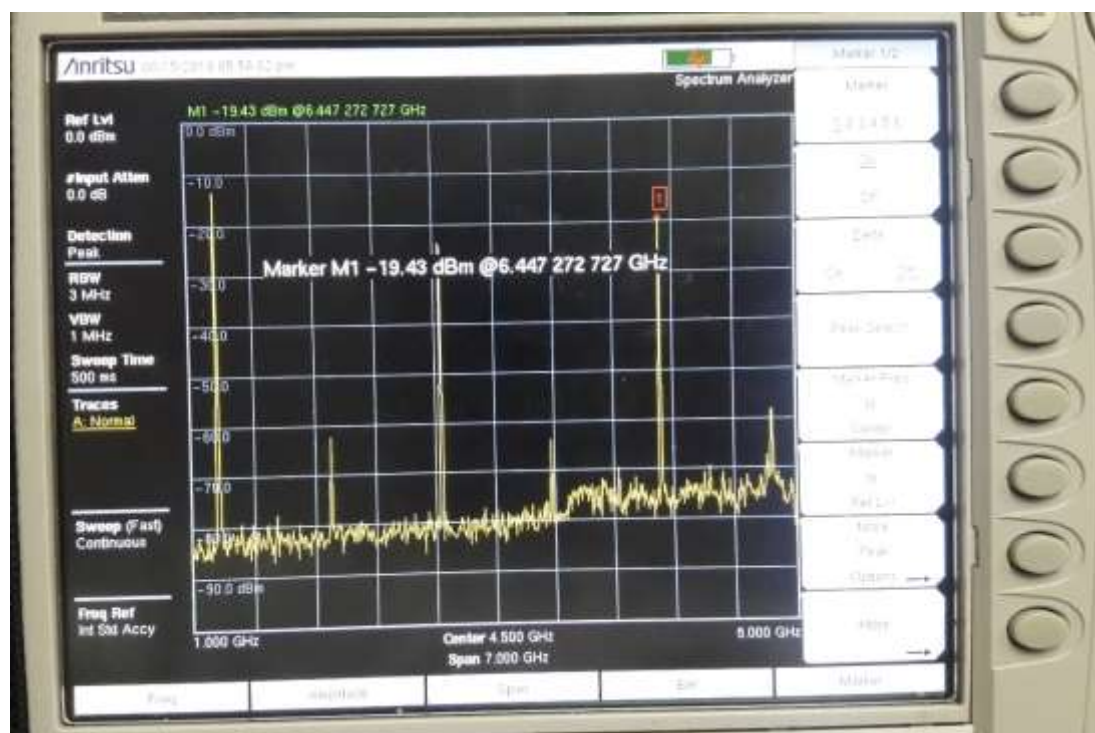
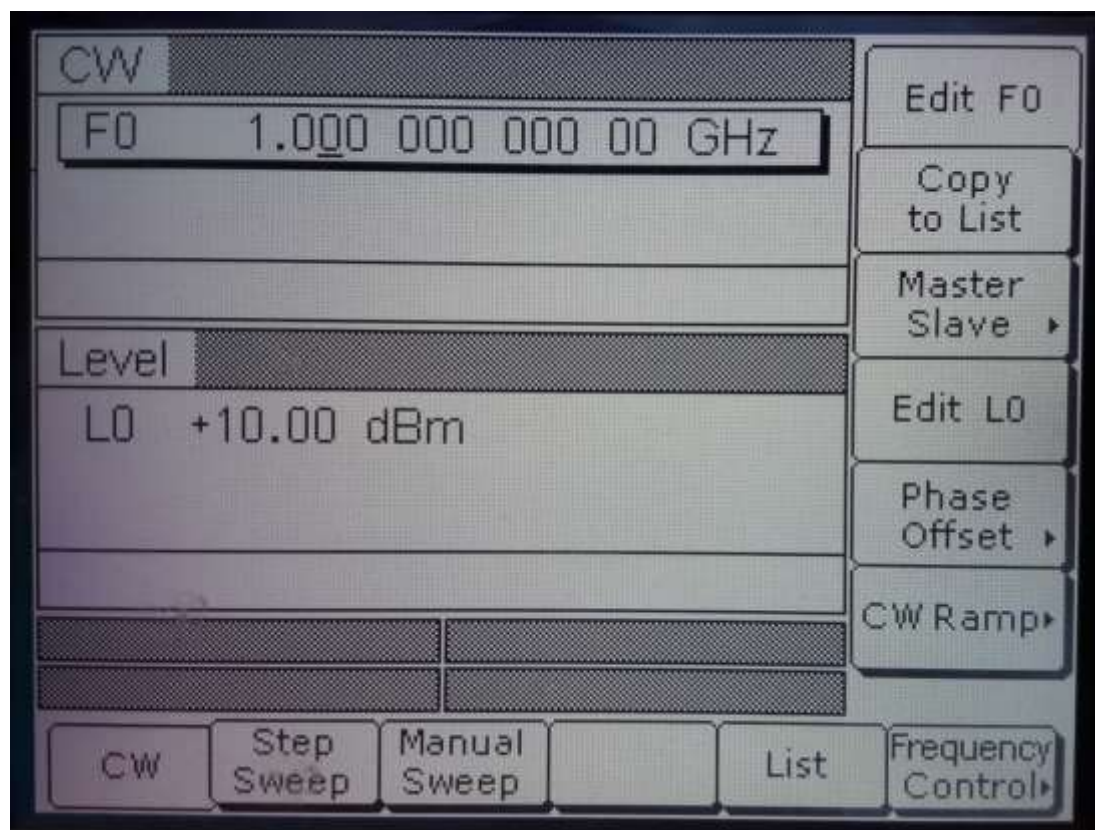
Mediciones del multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+ (Entrada 5 a 10GHz/Salida 10 a 20GHz)



Mediciones del multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+ (Entrada 2.2 a 4 GHz/Salida 6.6 a 12GHz)



Mediciones del multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+ (Entrada 1 a 1.6 GHz/Salida 5 a 8GHz)



Anexo C: Código en Matlab

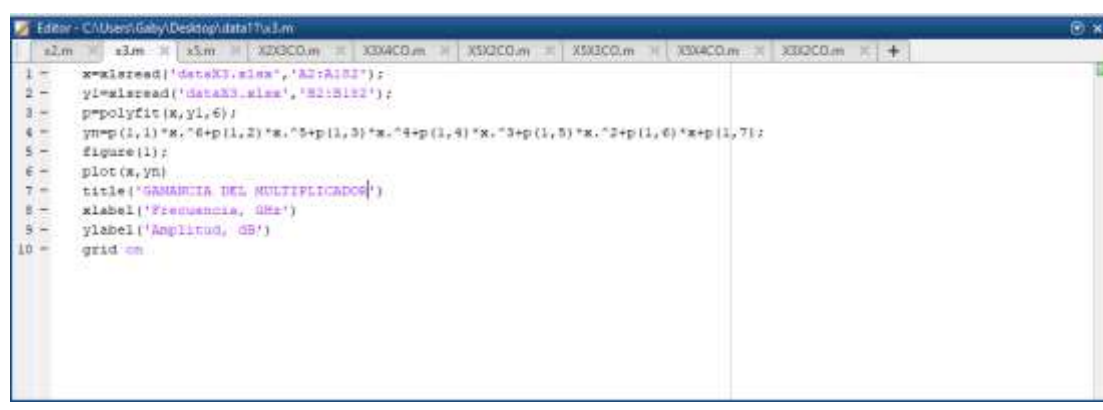
Código del Multiplicador de frecuencia X2 KSX2-24+



The screenshot shows a MATLAB script in the Editor window. The script reads data from 'dataX2.xlsx', fits a polynomial, and plots the gain versus frequency. The title of the plot is 'GANANCIA DEL MULTIPLICADOR'.

```
1 - x=xlswread('dataX2.xlsx','A2:A502');
2 - y1=xlswread('dataX2.xlsx','B2:B502');
3 - p=polyfit(x,y1,6);
4 - ym=p(1,1)*x.^6+p(1,2)*x.^5+p(1,3)*x.^4+p(1,4)*x.^3+p(1,5)*x.^2+p(1,6)*x+p(1,7);
5 - figure(1);
6 - plot(x,ym);
7 - title('GANANCIA DEL MULTIPLICADOR');
8 - xlabel('Frecuencia, GHz');
9 - ylabel('Amplitud, dB');
10 - grid on
```

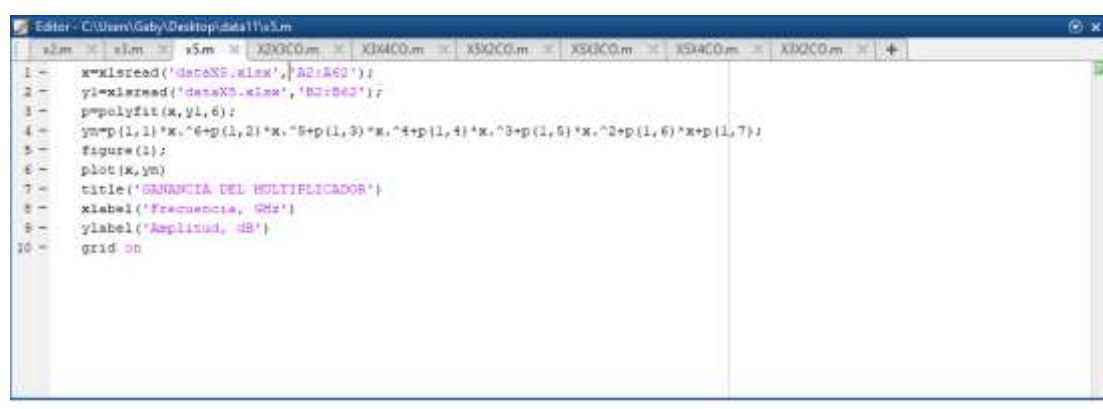
Código del Multiplicador de frecuencia X3 RMK-3-123+



The screenshot shows a MATLAB script in the Editor window. The script reads data from 'dataX3.xlsx', fits a polynomial, and plots the gain versus frequency. The title of the plot is 'GANANCIA DEL MULTIPLICADOR'.

```
1 - x=xlswread('dataX3.xlsx','A2:A102');
2 - y1=xlswread('dataX3.xlsx','B2:B102');
3 - p=polyfit(x,y1,6);
4 - ym=p(1,1)*x.^6+p(1,2)*x.^5+p(1,3)*x.^4+p(1,4)*x.^3+p(1,5)*x.^2+p(1,6)*x+p(1,7);
5 - figure(1);
6 - plot(x,ym);
7 - title('GANANCIA DEL MULTIPLICADOR');
8 - xlabel('Frecuencia, GHz');
9 - ylabel('Amplitud, dB');
10 - grid on
```

Código del Multiplicador de frecuencia X5 RMK-5-83+



The screenshot shows a MATLAB script in the Editor window. The script reads data from 'dataX5.xlsx', fits a polynomial, and plots the gain versus frequency. The title of the plot is 'GANANCIA DEL MULTIPLICADOR'.

```
1 - x=xlswread('dataX5.xlsx','A2:A62');
2 - y1=xlswread('dataX5.xlsx','B2:B62');
3 - p=polyfit(x,y1,6);
4 - ym=p(1,1)*x.^6+p(1,2)*x.^5+p(1,3)*x.^4+p(1,4)*x.^3+p(1,5)*x.^2+p(1,6)*x+p(1,7);
5 - figure(1);
6 - plot(x,ym);
7 - title('GANANCIA DEL MULTIPLICADOR');
8 - xlabel('Frecuencia, GHz');
9 - ylabel('Amplitud, dB');
10 - grid on
```


Anexo D: Datasheet Frequency Multiplier X2 KSX2-24+

X2 Frequency Multiplier

50Ω Output 10 to 20 GHz

KSX2-24+



CASE STYLE: HV1195

+RoHS Compliant

The +RoHS identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

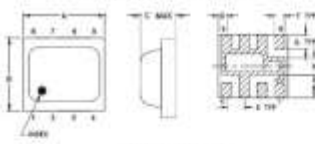
Maximum Ratings

Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Input, 25°C	100 mW
Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.	

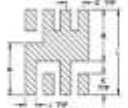
Pin Connections

INPUT	4
OUTPUT	8
50Ω TERMINATE EXT.	2
GROUND	1,3,5,6,7

Outline Drawing



PCB Lead Pattern

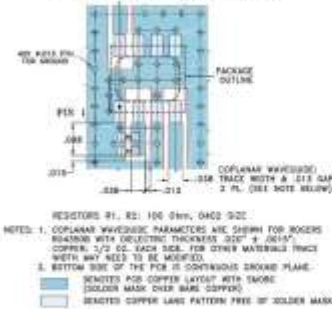


Suggested Layout:
Tolerance to be within ±0.02

Outline Dimensions (mil)

A	B	C	D	E	F	G
200	180	567	1025	1050	1025	343
3.00	4.57	2.31	0.64	1.27	0.71	1.00
H	J	K	L	M	N	wt
0.90	0.90	0.60	0.238	0.144	0.065	grams
1.27	0.76	1.52	0.50	3.66	1.65	0.88

Demo Board MCL P/N: TB-473+ Suggested PCB Layout (PL-287)



Notes

- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document was based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and test measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchases of this part are subject to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and benefits thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp

Mini-Circuits

www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0000 (718) 934-4300 sales@minicircuits.com

Features

- low conversion loss, 11.5 dB typ.
- high fundamental & harmonic suppression, F1, 30 dBc typ.; F3, 35 dBc typ.; F4, 25 dBc typ.
- LTCC design
- low profile, 0.085"
- aqueous washable

Applications

- synthesizers
- local oscillators

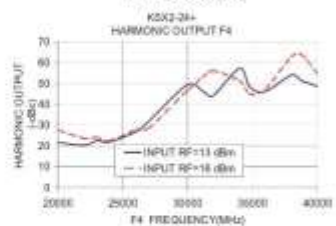
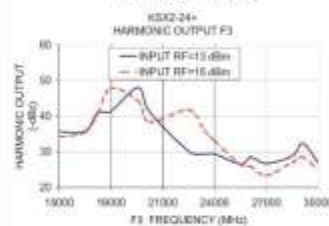
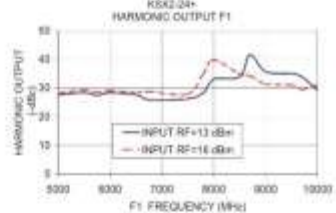
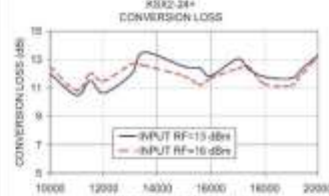
Electrical Specifications

MULTIPLICATION FACTOR	FREQUENCY (GHz)		INPUT POWER (dBm)		CONVERSION LOSS (dB)		HARMONIC OUTPUT (dBc)					
	F1 Input	F2 Output	Min.	Max.	Typ.	Max.	F1	F2	F3	F4	F5	F6
2	5-8	10-16	13	16	11.5	15	30	18	36	23	25	15
			10	13	15	18	21	14	30	18	20	13
	8-10	16-20	13	16	12	15	33	20	27	17	50	35
			10	13	15	18.5	30	16	23	16	40	30

* Harmonics of input frequency below the power level of F2

Typical Performance Data

Input Frequency (MHz)	INPUT RF= 13dBm					INPUT RF= 16dBm				
	Conversion Loss (dB) F2	F1	F3	F4		Conversion Loss (dB) F2	F1	F3	F4	
5000.00	12.00	27.66	39.68	31.67		12.50	28.16	34.16	27.68	
5500.00	10.48	28.33	35.89	20.40		10.81	29.34	35.52	23.74	
5750.00	11.51	27.39	41.04	22.47		12.01	28.45	40.87	24.16	
6000.00	10.64	29.35	41.35	22.02		11.48	29.02	47.95	22.52	
6500.00	12.00	27.53	47.97	27.17		12.67	28.45	44.30	28.05	
6750.00	13.50	25.87	41.12	31.85		12.57	28.77	38.39	28.54	
7500.00	12.50	28.19	30.10	43.49		11.83	27.87	41.77	46.76	
7800.00	12.37	28.34	29.35	48.17		11.21	34.97	38.01	53.17	
8000.00	11.84	33.06	29.35	44.32		11.67	33.81	33.03	56.06	
8500.00	13.03	33.87	26.84	57.26		12.36	34.63	38.38	51.43	
8750.00	12.33	41.57	28.51	48.35		12.50	34.23	25.85	44.99	
9000.00	11.78	35.72	28.65	46.24		11.28	31.39	23.35	47.40	
9500.00	11.85	35.01	28.85	54.08		11.16	31.02	27.02	62.92	
9700.00	12.33	33.85	32.33	51.30		12.00	29.51	28.50	63.90	
10000.00	13.30	29.27	25.97	48.71		13.13	31.03	24.97	54.71	

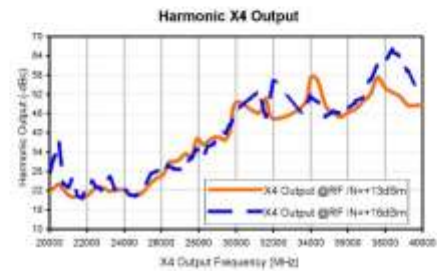
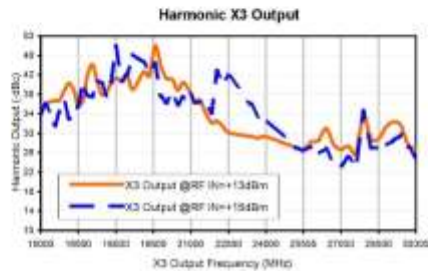
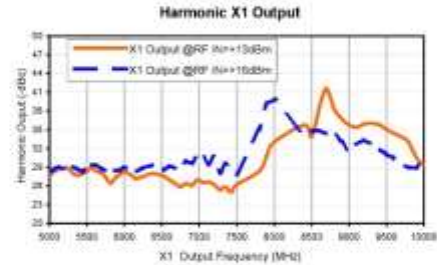


REV. A
M151187
KSX2-24+
ED-13349-0
DUP
190918

Frequency Multiplier (Doubler)

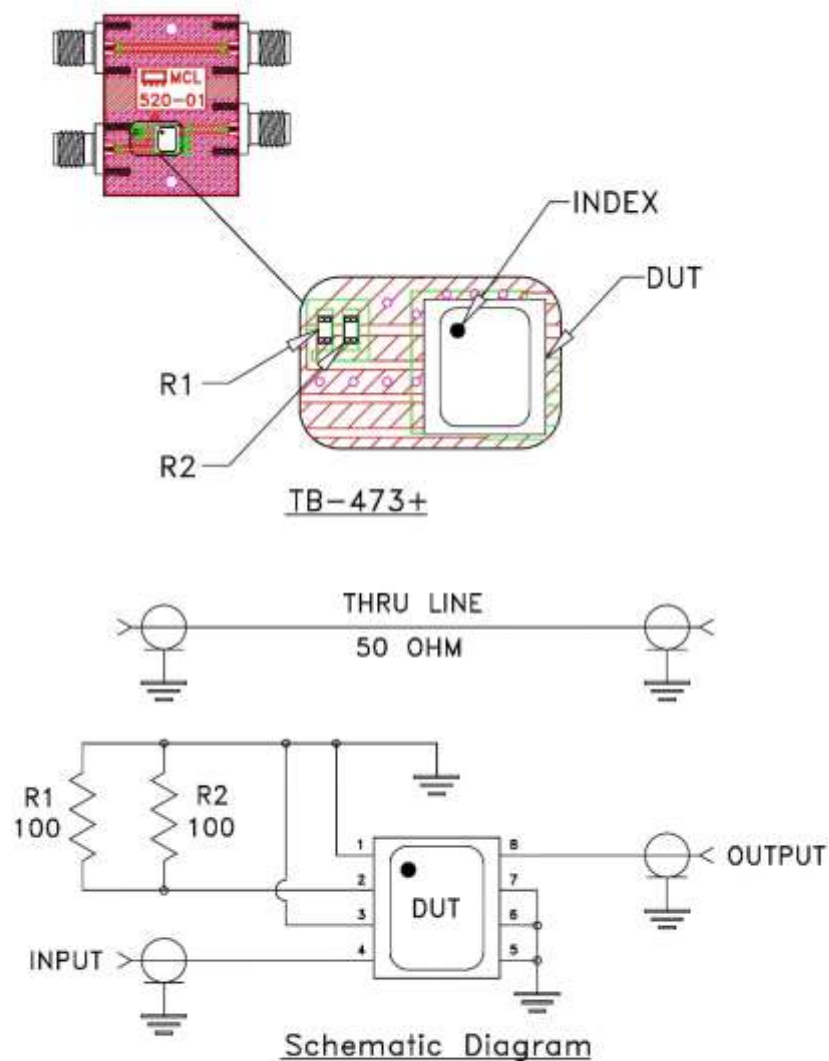
KSX2-24+

Typical Performance Curves




Evaluation Board and Circuit

For Pin Connections refer to Data Sheet of the DUT



Notes:

1. 50 Ohm SMA Female connectors.
2. PCB Material: RO4350 or equivalent,
Dielectric Constant=3.5, Thickness=.020 inch.

 **Mini-Circuits®**

Anexo E: Datasheet Frequency Multiplier X3 RMK-3-123+

X3 Frequency Multiplier

50Ω Output 6600 to 12000 MHz

RMK-3-123+



CASE STYLE: TT1224

Maximum Ratings

Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Input Power	17 dBm

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded

Pin Connections

INPUT	1
OUTPUT	4
GROUND	2,3,5,6

Features

- broadband
- high rejection F2, -33 dBc typ.; F4, -45 dBc typ.
- low cost
- aqueous washable

Applications

- synthesizers
- local oscillators
- satellite up and down converters

Electrical Specifications

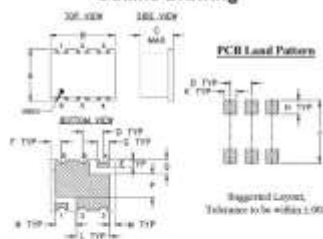
MULTIPLICATION FACTOR	FREQUENCY (MHz)		INPUT POWER (dBm)	CONVERSION LOSS (dB)	HARMONIC OUTPUT (dBc)			
	F1 Input	F3 Output			F1	F2	F4	
3	2200-4000	6600-12000	Min. Max.	Typ. Max.	Typ. Min.	Typ. Min.	Typ. Min.	Typ. Min.
			13 17	15.5 21	5 -5	33 22	45 34	

* Harmonics of input frequency below the power level of F3.

Typical Performance Data

INPUT RF= 13 dBm					INPUT RF= 17 dBm				
Input Frequency (MHz)	Conversion Loss (dB)	Harmonic Output Below F3 (-dBc)			Conversion Loss (dB)	Harmonic Output Below F3 (-dBc)			
	F3	F1	F2	F4		F3	F1	F2	F4
2200.00	17.10	8.46	63.81	41.26	15.62	10.96	45.36	50.70	
2400.00	14.70	7.47	42.53	40.96	14.11	10.96	44.54	52.89	
2500.00	14.46	7.00	42.64	38.29	15.01	9.37	42.60	41.84	
2700.00	14.20	6.21	41.87	46.44	14.75	8.74	43.18	50.24	
2800.00	14.02	5.27	41.35	64.48	15.28	7.70	42.28	54.85	
2900.00	15.15	4.65	41.77	62.55	15.56	7.05	40.84	53.91	
3000.00	15.71	3.85	42.22	52.88	15.82	6.48	38.36	53.31	
3100.00	15.33	3.81	42.33	45.33	15.52	6.25	35.03	51.60	
3150.00	15.36	3.71	39.82	44.86	15.54	5.93	33.63	52.04	
3240.00	15.35	3.51	37.49	43.68	15.53	5.65	31.88	51.49	
3360.00	15.07	3.32	35.11	43.68	15.36	5.45	30.38	48.72	
3430.00	14.88	3.22	33.65	43.68	15.58	5.07	30.14	47.82	
3480.00	15.07	3.03	33.88	43.56	15.58	4.98	30.01	47.07	
3530.00	15.17	2.71	31.33	43.53	15.86	4.48	28.99	45.90	
3580.00	15.55	2.23	30.04	43.74	16.17	4.07	25.81	44.40	
3640.00	15.52	1.77	29.35	44.28	16.43	3.58	25.12	43.44	
3700.00	16.22	1.25	28.85	47.10	16.78	3.08	28.36	41.94	
3820.00	17.26	-0.00	38.02	50.31	17.81	1.85	34.73	38.30	
3880.00	17.64	-0.56	35.44	40.85	18.20	1.29	36.72	38.63	
4000.00	18.62	-1.67	28.32	37.26	19.11	-0.8	35.07	41.63	

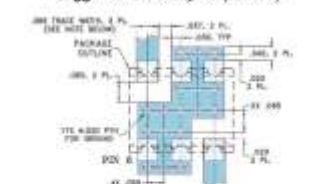
Outline Drawing



Outline Dimensions (inches)

A	B	C	D	E	F	G	H
.25	.31	.16	.100	.040	.055	.060	.065
.035	.781	4.05	2.54	1.23	1.41	1.53	1.85
J	K	L	M	N	P	Q	Wt
.300	.060	.180	.025	.100	.110	.070	grams
7.62	1.52	4.00	0.64	2.54	2.79	1.78	0.18

Demo Board MCL P/N: TB-393 Suggested PCB Layout (PL-258)



NOTE: 1. TRACE WIDTH IS SHOWN FOR ROHS COMPLIANT WITH SELECTIVE "THICKENED COPPER" & "GOLD" COATING 1/15 OZ. EACH SIDE. FOR OTHER MATERIALS, TRACE WIDTH MAY VARY 50% AT MINIMUM. 2. BOTTOM SIDE OF THE PCB IS CONTINUOUS GROUND PLANE. 3. COATED PCB COVER LAYOUT WITH SOLDER (COUSPER SOLDER COAT SOLDER COUSPER). 4. COUSPER SOLDER LAYER MUST BE FREE OF SOLDER MASK.

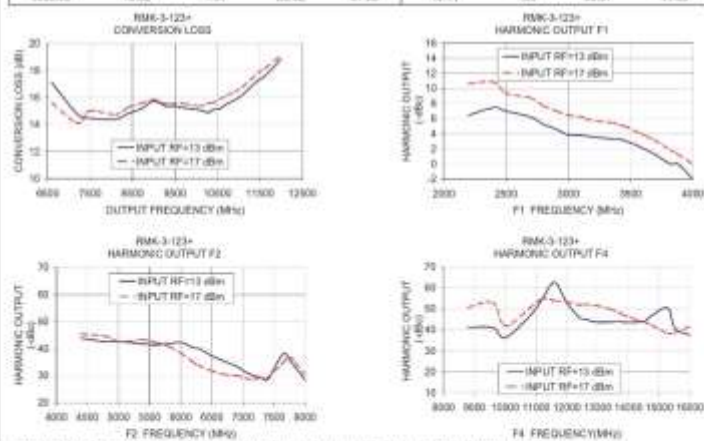
Notes

- Performance and quality attributes and conditions not explicitly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of the specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable standard test performance criteria and measurement instruments.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of the part are intended to the right of the standard terms and conditions. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights to and remedies therefor, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MC_Store/terms.jsp

Mini-Circuits®

www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4000 sales@minicircuits.com

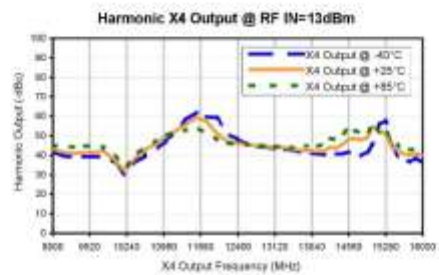
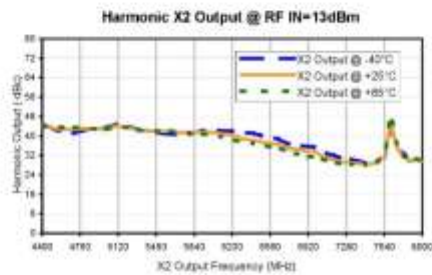
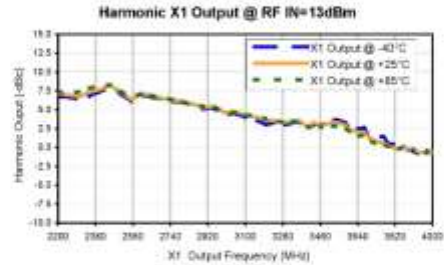
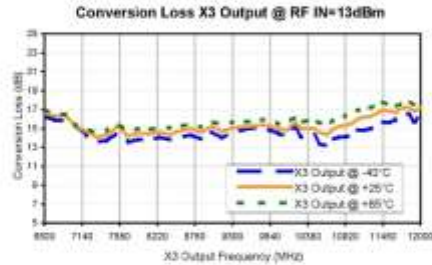
REV A
M111107
RMK-3-123+
ED-120541
DUCP000
1/2003
Page 1 of 1



Frequency Multiplier (Tripler)

RMK-3-123+

Typical Performance Curves

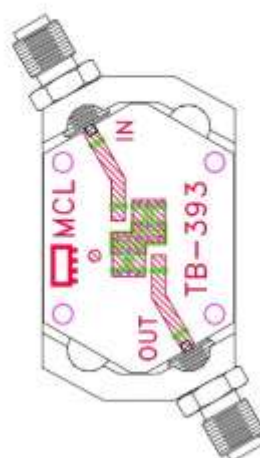


P.O. Box 200188, Brooklyn, New York 11220-0188 (718) 336-6300 Fax (718) 336-6301 For detailed performance specs & shipping info see Mini-Circuits web site
 The Design Engineer's Search Engine: Providing ACPLUG Data frequently from RMK-CIRCUITS to www.minicircuits.com
 © 2007 Mini-Circuits, LLC RMK-3-123+ 1/07

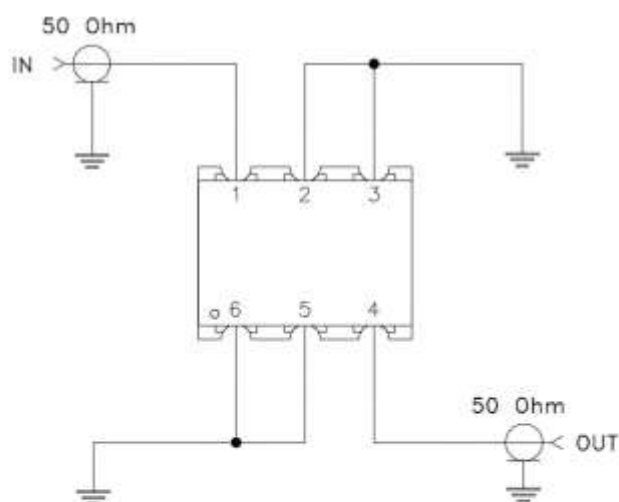


REV. X2
 RMK-3-123+
 7/8/2009
 Page 1 of 2

Evaluation Board and Circuit




TB-393



Schematic Diagram

Notes:

1. SMA Female connectors.
2. PCB Material: Rogers R04350 or equivalent,
Dielectric Constant=3.5, Thickness=.030 inch.

 Mini-Circuits®

Anexo F: Datasheet Frequency Multiplier X5 RMK-5-83+

X5 Frequency Multiplier

50Ω Output 5000 to 8000 MHz

RMK-5-83+



CASE STYLE: TT1224

Maximum Ratings

Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Input Power	13 dBm

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Pin Connections

INPUT	1
OUTPUT	4
GROUND	2,3,5,6

Features

- high rejection of adjacent harmonic, 56 dBc typ.
- aqueous washable
- broadband
- low input power required

Applications

- synthesizers
- local oscillators
- satellite up and down converters

+RoHS Compliant

The + suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

Electrical Specifications at 25°C

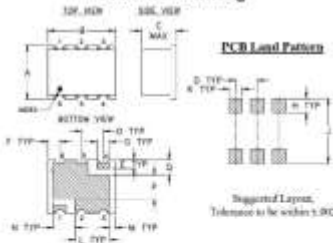
Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
Multiplier Factor		5		
Frequency Range, Input (F1)	1000		1600	MHz
Frequency Range, Output (F5)	5000		8000	MHz
Input Power	-2		+1	dBm
Conversion Loss	—	26	34.5	dB
Harmonic Output*				dBc
F2	-15	-3.5	—	
F3	33	63.5	—	
F4	-15	-4.2	—	
F6	33	66.2	—	
F7	30	66.3	—	
F7	-4	10.2	—	

* Harmonics of input frequency below the power level of F5.

Typical Performance Data

Frequency		Conv. Loss (dB)	Harmonic Rejection Below F5, (dBc) at RF Input Power 11 dBm						
Input (MHz)	Output (MHz)		F2	F3	F4	F6	F7		
1000.00	5000.00	25.21	-4.33	-76.63	-4.01	-72.11	-67.47	-6.22	
1000.00	5100.00	24.96	-4.35	-76.49	-4.01	-72.86	-67.84	-6.73	
1040.00	5200.00	24.84	-4.32	-76.95	-3.98	-73.05	-67.60	-7.42	
1060.00	5300.00	24.60	-4.23	-76.95	-3.97	-73.86	-67.72	-8.10	
1080.00	5400.00	24.51	-4.04	-76.48	-3.94	-74.18	-67.69	-8.77	
1100.00	5500.00	24.60	-3.78	-76.76	-3.45	-75.15	-67.11	-9.55	
1120.00	5600.00	24.63	-3.45	-76.11	-3.22	-75.79	-66.93	-10.59	
1140.00	5700.00	24.51	-3.37	-75.54	-3.04	-77.22	-66.71	-11.61	
1160.00	5800.00	24.96	-2.69	-75.06	-2.33	-77.29	-66.21	-11.70	
1180.00	5900.00	25.44	-2.06	-73.74	-1.59	-76.36	-65.83	-12.25	
1200.00	6000.00	25.43	-1.86	-72.93	-1.14	-74.19	-65.63	-13.37	
1250.00	6250.00	28.37	0.80	-65.99	2.44	-67.94	-65.54	-13.75	
1300.00	6500.00	28.77	7.37	-65.24	3.62	-65.97	-66.85	-15.02	
1350.00	6750.00	28.87	7.71	-66.48	4.70	-65.80	-66.77	-15.98	
1400.00	7000.00	29.02	8.15	-63.80	5.66	-66.60	-65.53	-15.79	
1450.00	7250.00	29.21	8.75	-64.33	6.77	-67.06	-65.27	-16.97	
1500.00	7500.00	30.12	10.02	-63.85	8.06	-66.23	-65.72	-11.94	
1520.00	7600.00	29.97	10.03	-64.10	8.17	-66.82	-65.06	-11.86	
1540.00	7700.00	30.22	10.46	-63.86	8.46	-66.92	-65.64	-11.36	
1560.00	7800.00	30.27	10.59	-63.90	8.69	-66.50	-66.26	-11.19	
1580.00	7900.00	30.51	11.15	-63.42	9.12	-65.90	-65.95	-10.83	
1600.00	8000.00	30.45	11.29	-62.95	9.25	-65.77	-65.83	-10.79	

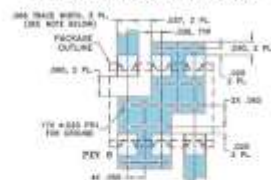
Outline Drawing



Outline Dimensions (inches)

A	B	C	D	E	F	G	H
25	31	18	100	548	055	090	085
0.98	1.17	0.69	3.94	1.58	1.40	1.02	1.00
J	K	L	M	N	P	Q	wt.
300	840	160	025	106	110	070	grams
7.00	1.52	4.06	0.04	2.94	5.79	1.79	0.58

Demo Board MCL P/N: TB-393 Suggested PCB Layout (PL-258)



NOTES: 1. TRAIL WIDTH IS SHOWN FOR MOUNTING ALONG WITH SOLDERING TACKS. 2. 100% P. 100% COVER 1/2 IN. LAYER. 3. FOR OTHER MOUNTING TACKS, REFER TO THE MOUNTING. 4. BOTTOM SIDE OF THE PCB IS COVERED GROUND PLANE. 5. CENTER THE COVER LAYOUT WITH BOARD. 6. COVER MAXIMUM SIZE 100mm. 7. COVERED COVER LAYOUT WITH THE OF BOARD.

Notes

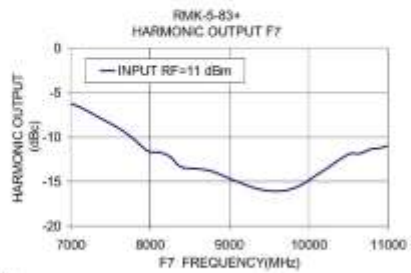
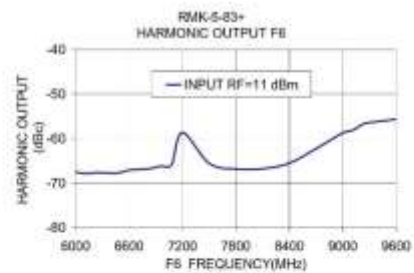
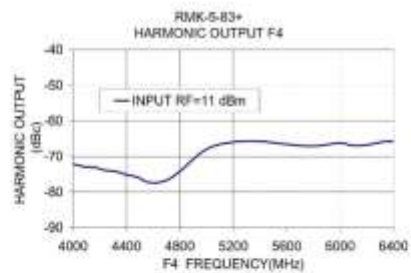
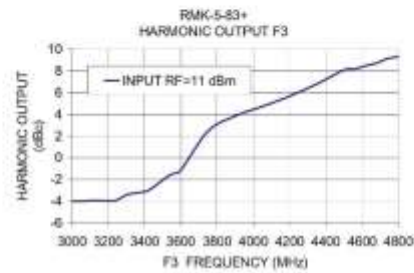
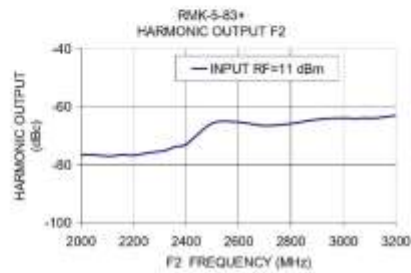
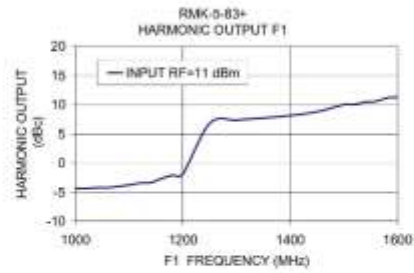
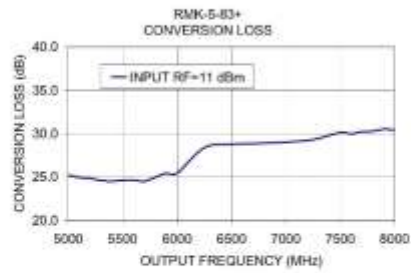
- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable standard test performance criteria and measurement instruments.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchases of the part are subject to the right of Mini-Circuits to modify the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereon; please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MC_Store/terms.jsp



www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4000 sales@minicircuits.com

REV A
01/15/13
80-14863
RMK-5-83+
42/CP488
13/06/13
Page 2 of 3

RMK-5-83+



Notes

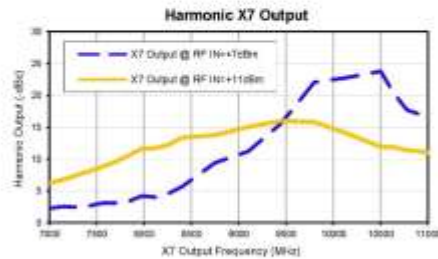
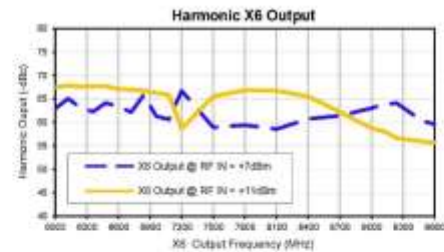
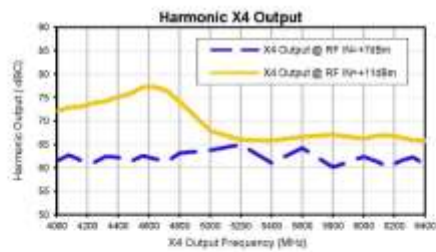
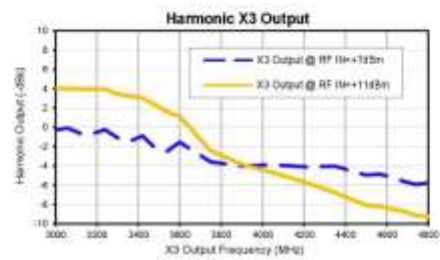
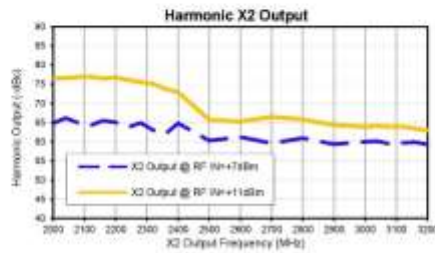
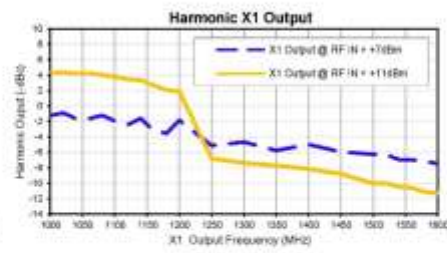
- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuit's standard limited warranty and terms and conditions outlined in "Standard Terms". Purchases of this part are subject to the right-hand benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the warranty rights and remedies thereon, please visit Mini-Circuit's website at www.minicircuits.com/MC_Store/terms.jsp



Frequency Multiplier (X5)

Typical Performance Curves

RMK-5-83+



Mini-Circuits

ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

P.O. Box 380186, Brooklyn, New York 11236-8003 • Fax (718) 854-4500 • For detailed performance specs & shopping online see Mini-Circuits with site



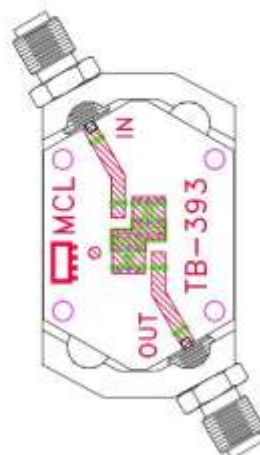
The Design Engineers Search Engine Provides ACTUAL Data Instantly From MINI-CIRCUITS At: www.minicircuits.com

RF/MICROWAVE COMPONENTS

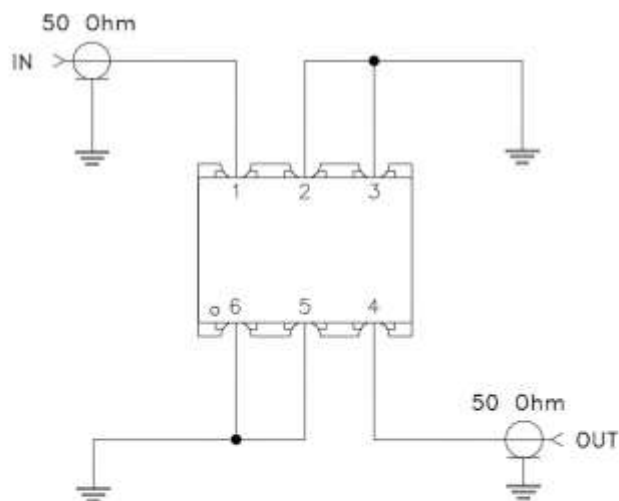
minicircuits.com

REV. OR
RMK-5-83+
1/26/2015
Page 1 of 1

Evaluation Board and Circuit




TB-393



Schematic Diagram

Notes:

1. SMA Female connectors.
2. PCB Material: Rogers R04350 or equivalent,
Dielectric Constant=3.5, Thickness=.030 inch.

 Mini-Circuits®

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE Y LA
INVESTIGACIÓN**

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 14/11/2019

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombre – Apellido: José Luis Hernández Ríos
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Informática y Electrónica
Carrera: Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes
Título a optar: Ingeniero en Electrónica, Telecomunicaciones Redes
f. Documentalista responsable: